

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE
CALENTAMIENTO DE AIRE POR COMBUSTIÓN DE BIOMASA Y
RADIACIÓN SOLAR PARA SECADO DE YUCA (*Manihot Esculenta*) EN LA
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**



KEIMER ALONSO MARTÍNEZ PADILLA

PEDRO JOSÉ MIRANDA LUGO

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA-CÓRDOBA**

2015

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE
CALENTAMIENTO DE AIRE POR COMBUSTIÓN DE BIOMASA Y
RADIACIÓN SOLAR PARA SECADO DE YUCA (*Manihot Esculenta*) EN LA
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

KEIMER ALONSO MARTÍNEZ PADILLA

PEDRO JOSÉ MIRANDA LUGO

**Proyecto de grado como requisito para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

DIRECTOR

RAMIRO TORRES GALLO, M.Sc.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA- CÓRDOBA

2015

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

DEDICATORIA

A mis padres los cuales son mi mayor motivación. Gracias a sus sacrificios, apoyo incondicional y consejos que constantemente recibía de parte de ellos, hoy se hace realidad este sueño. A mis familiares, compañeros y personas que de una u otra forma contribuyeron a mi formación como Ingeniero Mecánico. Y por último pero no menos importante a María C. quien estuvo respaldando mis ideas y apoyando en los momentos donde las cosas parecen no tener solución.

Keimer Alonso Martínez Padilla.

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres, padrinos y hermanos que son las personas que siempre me han apoyado, creído y confiado en mí.

Fue un camino largo con muchos tropiezos y dificultades que muchas veces me hicieron desfallecer, pero gracias a Dios tuve personas a mi lado que me dieron una voz de aliento para seguir adelante. Mis amigos de tantas batallas en la universidad y con los cuales tengo muchos buenos recuerdos y anécdotas, mis hermanos Pablo, Liam y Pacheco con los cuales he vivido muchas cosas y las que faltan aún... este trabajo es para todos ellos que siempre estuvieron luchando conmigo para alcanzar esta meta.

Por ultimo le quiero agradecer y dedicar este triunfo a Dánika, por estar conmigo durante todo el tiempo de duró este trabajo, por escucharme, darme fuerzas y apoyarme en momentos difíciles, por entenderme cuando estuve horas y horas secando Yuca o estudiando y no pude compartir tiempo con ella.

Pedro José Miranda Lugo

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecemos a Dios por habernos dado sabiduría y fortaleza para realizar este trabajo. Fueron muchas las personas que estuvieron junto con nosotros colaborándonos de muchas formas, profesores, amigos, conocidos, trabajadores de la universidad y demás. Solo tenemos palabras de agradecimientos a cada uno de esas personas y les pedimos disculpa si en algún momento les causamos molestias o los incomodamos de alguna forma.

Le agradecemos especialmente a nuestro director Ramiro Torres Gallo, a los ingenieros William Beltrán, Jairo Torres, Jorge León, Rafael Gómez, Jorge Mario Fandiño y Yahir González por ayudarnos en la construcción del equipo y orientarnos a lo largo de este proyecto.

Muchas gracias al ingeniero Teobaldís Mercado por haber gestionado muy amablemente un predio para realizar el montaje del equipo. También a la señora Libia y los vigilantes del bloque de Ciencias Agrícolas por permitirnos usar sus instalaciones durante todo el tiempo en que se realizaron las pruebas experimentales del equipo.

Al laboratorio de Suelos de la Universidad de Córdoba por prestar sus instalaciones y equipos. De la misma manera, le agradecemos a la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) por suministrarnos los datos de radiación solar en la ciudad de Montería.

Para terminar queremos agradecerles a las secretarias del programa Angelica Negrete y Alcira Cabrales por ayudarnos en todas las cartas y formularios que necesitamos durante todo este tiempo.

Muchas gracias a todos por su valiosa ayuda y esperamos que este trabajo sea de gran satisfacción para ustedes.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. REVISION DE LA LITERATURA	4
1.1. SECADO	4
1.2. SECADO DE YUCA	12
1.2.1 Métodos para el secado de yuca	13
1.3. COLECTOR SOLAR TÉRMICO	13
1.4. BIOMASA.....	15
1.6. MATERIA DE CAMBIO DE FASE (PCM)	17
1.6.1. PARAFINAS.....	19
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
2.1. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LA YUCA	21

2.3. SIMULACIÓN TÉRMICA DEL FENÓMENO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL INTERIOR DEL COLECTOR SOLAR.	22
2.4. DISEÑO, ELABORACIÓN DE PLANOS Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AIRE.....	23
2.5. CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AIRE.....	24
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
3.1. PORCENTAJE DE HUMEDAD INICIAL Y CURVA DE TIEMPO DE SECADO POR MEDIO DE UNA ESTUFA DE FLUJO ESTÁTICO EN EL LABORATORIO.	28
3.2. SIMULACIÓN TÉRMICA EN LOS COLECTORES SOLARES	29
3.3. DISEÑO DEL SISTEMA HIBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AIRE POR COMBUSTIÓN DE BIOMASA Y RADIACIÓN SOLAR PARA SECADO DE YUCA.....	31
3.3.1. Ventilador centrífugo.....	31
3.3.2. Colectores solares de placa plana	31
3.3.3. PCM (Parafina) en los colectores solares.....	32
3.3.4. Quemador de combustible sólido con intercambiador de calor	33
3.3.5. Secador de productos agrícolas.....	33

3.4. VALIDACIÓN DEL EQUIPO DISEÑADO	35
3.4.1. Operación del equipo en modo solar	35
3.4.2. Operación del equipo en modo híbrido	38
3.4.3. Operación del equipo en modo combustión de biomasa	40
4. CONCLUSIONES.....	44
5. RECOMENDACIONES.....	47
6. BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXOS	52

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO 1. EQUIPOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LA HUMEDAD DE LA YUCA POR EL MÉTODO AOAC 925.10.	52
ANEXO 2. CÁLCULOS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA EN EL INTERIOR DE LOS COLECTORES SOLARES.....	52
ANEXO 3. EQUIPOS PARA REALIZAR LA CURVA DE TIEMPO DE SECADO A 50 Y 70 °C EN EL LABORATORIO.....	62
ANEXO 4. CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS COLECTORES SOLARES.	63
ANEXO 5. CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL QUEMADOR DE CASCARILLA DE ARROZ.	68
ANEXO 6. CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJO CRUZADO.....	70
ANEXO 7. PLANOS DEL SISTEMA HÍBRIDO	73
ANEXO 8. COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AIRE Y DIFERENTES FORMAS DE FUNCIONAMIENTO.	88

ANEXO 9. PORCENTAJE DE HUMEDAD INICIAL Y CURVA DE TIEMPO DE SECADO POR MEDIO DE UNA ESTUFA DE FLUJO ESTÁTICO EN EL LABORATORIO.	91
ANEXO 10. SIMULACIÓN TÉRMICA EN LOS COLECTORES SOLARES.	94
ANEXO 11. CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA RETIRADA EN LOS 5 KG DE YUCA.	95
ANEXO 12. OPERACIÓN DEL EQUIPO EN MODO SOLAR.	96
ANEXO 13. OPERACIÓN DEL EQUIPO EN MODO HÍBRIDO.	98
ANEXO 14. OPERACIÓN DEL EQUIPO EN MODO COMBUSTIÓN DE BIOMASA	100
ANEXO 15. TEXTURA DE LA YUCA DESPUES DEL SECADO	102

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1. Propiedades térmicas de algunas parafinas</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2. Especificaciones técnicas del Sistema híbrido diseñado.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla A9.1. Porcentaje de humedad inicial de la Yuca variedad Venezolana.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabla A9.2. Masa final en (g) y tiempo de secado (min) de las muestras de Yuca variedad Venezolana a 50°C.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla A9.3. Masa final en (g) y tiempo de secado (min) de las muestras de Yuca Venezolana a 70°C.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla A10.1. Resultados de simulación térmica para 50 tubos en cada colector.</i>	<i>94</i>

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1. Vista general del Secador Solar</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Vista de sección lateral y trasera del secador solar</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3. Vista de sección del secador solar y vista de perspectiva del quemador.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4. Secador solar con respaldo de almacenamiento de energía térmica.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5. Secador Solar-Biomasa</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6. Secador híbrido (Solar-Gas propano).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7. Colector Solar Térmico</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8. Quemador de parrilla.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9. Clasificación de PCMs</i>	<i>19</i>
<i>Figura A1.1. Equipo de secado y balanza analítica para determinar humedad de la yuca</i>	<i>52</i>
<i>Figura A2.1. El volumen de control a estudiar en la simulación.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura A2.2. Esquema de las direcciones de transferencia de calor junto con la forma de transferencia (convección o radiación) que se presenta entre los componentes del sistema.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura A3.1. (a) estufa (b) parilla con yuca..... (c) balanza</i>	<i>62</i>
<i>Figura A8.1. Ventilador centrífugo.....</i>	<i>88</i>

Figura A8.2. <i>Colectores solares de placa plana con material de cambio de fase PCM (parafina).</i>	88
Figura A8.3. <i>Quemador de combustible sólido.</i>	89
Figura A8.4. <i>Secador de productos agrícola.</i>	89
Figura A8.5. <i>Sistema híbrido de calentamiento de aire en modo solar.</i>	90
Figura A8.6. <i>Sistema híbrido de calentamiento de aire en modo híbrido.</i>	90
Figura A8.7. <i>Sistema híbrido de calentamiento de aire en modo combustión de biomasa.</i>	91
Figura A9.1. <i>Curva de tiempo de secado a 50°C con estufa de flujo estático.</i>	93
Figura A9.2. <i>Curva de tiempo de secado a 70°C con estufa de flujo estático.</i>	93
Figura A10.1. <i>Variación de las temperaturas de los componentes del colector solar respecto al tiempo.</i>	94
Figura A10.2. <i>Variación de los Calores (Q) transferidos al aire respecto al tiempo.</i>	94
Figura A12.1. <i>Variación de la temperatura en el interior del secador respecto al tiempo de secado.</i>	96
Figura A12.2. <i>Variación de la temperatura del aire en los colectores solares respecto al tiempo.</i>	96
Figura A12.3. <i>Variación de la temperatura y la humedad relativa del aire en el interior del quemador respecto al tiempo.</i>	97
Figura A12.4. <i>Curva de tiempo de secado modo solar.</i>	97
Figura A13.1. <i>Variación de la temperatura del aire en los colectores solares respecto al tiempo.</i>	98

Figura A13.2. Variación de la temperatura al interior del secador respecto al tiempo de secado.....	98
Figura A13.3. Curva de tiempo de secado modo híbrido.	99
Figura A13.4. Variación de la humedad del aire respecto a la temperatura al interior del secador.	99
Figura A14.1. Variación de la temperatura del aire respecto al tiempo.	100
Figura A14.2. Variación de la temperatura en el interior del secador respecto al tiempo.	100
Figura A14.3. Variación de la temperatura y la humedad relativa del aire al interior del secador respecto al tiempo.....	101
Figura A14.4. Curva de tiempo de secado modo combustión de biomasa	101
Figura A15.1. Yuca después del secado en modo Solar	102
Figura A15.2. Yuca después del secado en modo híbrido	102
Figura A15.3. Yuca después del secado en modo combustión de biomasa.	103

RESUMEN

Se diseñó, construyó y validó un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar para el secado de productos agrícolas a pequeña escala, el cual consta de un ventilador centrífugo, dos colectores solares, un quemador de combustible sólido y un secador. Para llevar a cabo las pruebas del equipo, se realizó el secado de 5 kg de Yuca variedad Venezolana en tres modos de operación: solar, híbrido y combustión de biomasa. Esta fase experimental se llevó a cabo en la Universidad de Córdoba, Colombia entre los meses de mayo y junio.

Para las pruebas en modo solar se estableció una temperatura óptima de secado de 50 °C, el equipo estuvo conformado por un ventilador centrífugo, dos colectores solares y el secador en donde se encontraba la Yuca partida en trozos. Los colectores solares fueron dispuestos en serie y acoplados por medio de una tubería de PVC. Cada colector contó con 50 latas de aluminio ubicadas en forma escalonada, rellenas de parafina, la cual es un material de cambio de fase (PCM por sus siglas en Inglés) que debido a sus propiedades térmicas absorbió la mayor cantidad posible de energía proveniente de la radiación solar durante el día y la liberó en horas de la tarde en donde la radiación solar era baja. El aire de secado fue generado por un ventilador centrífugo YDK 300-6D con

un flujo de aire máximo de $3200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ y una potencia de $\frac{3}{4}$ hp y al pasar a través de los colectores solares aumentó su temperatura hasta unos 52°C aproximadamente.

Para el secado de la Yuca en los modos híbridos y combustión de biomasa, al equipo en modo solar se le agregó otro componente, el quemador de cascarilla de arroz. Dicho quemador fue acoplado entre el segundo colector y el secador, además contaba con un intercambiador de calor de flujo cruzado por el cual circulaba el aire de secado proveniente de los colectores. Para estos modos de operación la temperatura de secado establecida fue de 70°C , alcanzando temperaturas promedios en el interior del secador de 57°C para el modo híbrido y 52°C para el modo combustión de biomasa.

Los resultados obtenidos en la fase experimental mostraron que la velocidad de secado para el modo solar fue de $0.147 \text{ kg de agua} \cdot \text{h}^{-1}$ con eficiencias para los colectores del 43,91%, mientras que para el modo híbrido y de combustión de biomasa fueron de 0.170 y $0.169 \text{ kg de agua} \cdot \text{h}^{-1}$ respectivamente con eficiencias del 36,72% y 28,18% respectivamente. También, se tuvo que el menor tiempo de secado se consiguió cuando el equipo operó en modo híbrido (16 h 45 min) seguido por el modo combustión de biomasa (16 h 50 min) y el modo solar (19 h 15 min). Sin embargo, la Yuca que presentó mejor textura y menos suciedad en su superficie después del secado fue la obtenida en modo solar seguido por el modo híbrido y combustión de biomasa.

Con el diseño y construcción de este sistema híbrido de calentamiento de aire, se aportó un nuevo dispositivo para el secado de productos agrícolas empleando fuentes de energías renovables que contribuyen con la disminución de la contaminación ambiental en la región. También se tecnificó un proceso que se realiza a nivel industrial con el fin de que pequeños y medianos grupos agricultores del departamento de Córdoba que se encargan de cosechar, secar y distribuir cultivos para su comercialización realicen el secado de sus productos de una forma más técnica que la comúnmente realizada en las zonas rurales del departamento (secado a aire abierto).

Palabras Clave: Secado, material de cambio de fase PCM, velocidad de secado, tiempo de secado, sistema híbrido, horas solares.

ABSTRACT

The hybrid system of air heating by burning biomass and solar radiation is a team designed and built for drying agricultural products on a small scale, consists of a centrifugal fan, two solar collectors, solid fuel burner and a dryer. To conduct the equipment testing, was performed drying of 5 kg of Cassava Venezuelan variety in three modes of operation: Solar, hybrid and combustion of biomass. This experimental phase was conducted at the University of Cordoba, Colombia between the months of May and June.

For testing solar-optimal drying temperature of 50 ° C was established, the team consisted of a centrifugal fan, two solar collectors and dryer where cassava was cut into pieces. The solar collectors were arranged in series and coupled by means of a PVC pipe. Each collector had 50 aluminum cans located in staggered form, filled with paraffin, which is a material phase change (PCM for its acronym in English) that because of its thermal properties absorbed the maximum amount of energy from the solar radiation during the day and released in the afternoon where solar radiation was low. The drying air was generated by a centrifugal fan YDK 300-6D with a maximum

air flow of $3200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ and a power $\frac{3}{4}$ hp and by passing through the solar collectors temperature rose to about 52°C approximately.

For drying of cassava in hybrid modes and combustion of biomass, the equipment in solar mode was added another component, the burner rice husk. Said burner was coupled between the second manifold and dryer also had a heat exchanger of crossflow through which the drying air circulating from the collectors. For these operating modes set the drying temperature was 70°C , reaching average temperature inside the dryer 57°C for hybrid mode and 52°C for biomass combustion mode.

The results obtained in the experimental phase showed that the rate of drying for solar mode was $0.147 \text{ kg of water} \cdot \text{h}^{-1}$ while for the hybrid and biomass combustion mode were 0.170 and $0.169 \text{ kg of water} \cdot \text{h}^{-1}$ respectively. Also, it had the shorter drying time was achieved when the team operated in hybrid mode (16 h 45 min) followed by the combustion of biomass (16 h 50 min) and solar mode (19 h 15 min) mode. However, the Cassava that presented better texture and less dirt on the surface after drying was obtained in solar mode followed by hybrid mode and biomass combustion mode.

With the design and construction of this hybrid system of air heating, it will be provided a new device for drying agricultural products using renewable energy sources that contribute to the reduction of environmental pollution in the region. Also it was technified a process that is performed on an industrial level so that small and medium

farmers groups in the Cordoba department who are responsible for harvesting, drying and distribute crops for marketing carried drying their products in a more technical way as commonly performed in rural areas of the department (dried in the open air).

Key words: Drying, phase change material PCM, drying speed, drying time, hybrid system, solar hours.

INTRODUCCIÓN

El secado o deshidratación es una técnica común para la preservación de alimentos y otros productos como frutas y vegetales. Este es un proceso mediante el cual se elimina o reduce el porcentaje de humedad de una sustancia o materia por medio de la evaporación del agua localizada en la superficie de la misma.

Este proceso se emplea en muchas industrias que pertenecen a los diversos sectores de la economía, entre ellas la industria agro-alimentaria, en donde éste tiene como finalidad minimizar el grado de humedad superficial presente en los alimentos y así contrarrestar el crecimiento o desarrollo de enzimas o microorganismos que deterioran el mismo, de este modo dichas industrias aumentan el tiempo de vida de sus productos y a su vez obtienen mayores beneficios económicos debido a que se facilita la conservación de los alimentos, su manipulación en etapas posteriores, logrando un aumento en la calidad del producto.

Las técnicas para el secado incluye, al aire abierto, combustibles fósiles, eléctrico y secadores solares. El uso de secado al aire abierto presenta bajos gastos económicos pero éste a menudo resulta en alimentos contaminados y deterioro nutricional (Ratti,

Mujumdar 1997) . Los secadores que emplean combustibles fósiles contribuyen con la degradación del ambiente a través de deforestación y emisiones de gases (United Nations Environment Programme (UNEP), 1988). También, el uso de secadores eléctricos presenta ciertas limitaciones ya que éste puede emplearse solo en áreas que sean abastecidas de energía eléctrica. Por el contrario, la energía solar no es la única forma de energía amigable con el ambiente pero se encuentra disponible incluso en áreas remotas.

Durante los últimos años ha surgido la necesidad de emplear nuevos tipos de energía procedentes de fuentes naturales que son inagotables, es decir, que sean renovables. Estas nuevas fuentes han sido de gran importancia para el continuo desarrollo de países que cuentan con grandes cantidades de recursos naturales y se les denomina energías alternativas, energías verdes o energías renovables, entre las cuales se destacan por su uso desde hace muchos años la energía hidráulica o hídrica, la energía eólica y algunas que actualmente presentan un auge como lo son la energía solar y la biomasa, entre otros tipos como la energía mareomotriz y la energía geotérmica.

Si bien es cierto, la técnica de secado empleada para la deshidratación de productos agrícolas, frutas, granos, vegetales, carnes y pescados ha sido usada por cientos de años pero de forma poco tecnificada, el método más conocido es el secado al aire abierto. Es por ello que a medida que ha transcurrido el tiempo ha tomado gran importancia el desarrollo de máquinas o dispositivos que permitan realizar técnicas como la

anteriormente descrita, que sean capaces de funcionar con grandes cantidades de cultivos y tomen menor tiempo para el desarrollo de tareas que impliquen altas exigencias de calidad, es decir, máquinas de mayor eficiencia y mucho más tecnificadas. Para la fabricación de éstas máquinas, se ha optado por implementar sistemas de integración tecnológica de energías renovables, como es el caso de la energía solar y la biomasa.

En el presente trabajo, se diseña y construye un sistema híbrido de calentamiento de aire que emplea energías renovables para llevar a cabo el secado de Yuca variedad venezolana. El funcionamiento del sistema se basa en el calentamiento de aire por radiación solar durante el día y por medio de combustión de biomasa (cascarilla de arroz) en horas de la noche, días con poca radiación o altas nubosidades y temporadas de lluvias. Cuenta con un sistema de monitoreo de temperatura, el cual permite tener una visión del funcionamiento del sistema y conocer la variación de las temperaturas del aire de secado en diferentes puntos del equipo.

1. REVISION DE LA LITERATURA

1.1. SECADO

El secado o deshidratación se usa como técnica de preservación de alimentos. Este es un proceso mediante el cual se elimina o reduce el porcentaje de humedad de una sustancia o materia por medio de la evaporación del agua localizada en la superficie de la misma. Es un método que permite alargar la vida útil de los alimentos, pues muchas enzimas y microorganismos que causan cambios químicos en los mismos, no pueden crecer y desarrollarse en ausencia de agua (Montero, 2006).

El secado solar o al aire ambiente es el método más común para el secado de productos agrícolas. Algunos de los inconvenientes con éste método incluye higiene inaceptable asociado con los productos, dependencia del tiempo, especialmente los efectos de las lluvias, inconvenientes en operación ya que los productos no pueden ser secados durante la noche y necesitan ser recogidos y redistribuidos, además, no se puede predecir la duración del tiempo de secado y la velocidad del secado al aire abierto es lenta (Ekechukwu, 1999).

Los secadores solares en términos generales se pueden clasificar en secadores solares directos, indirectos y especializados (Foster, et al. 1980). Secadores solares directos tienen el material a secar en un recinto cerrado, con una cubierta transparente sobre éste. El calor es generado por absorción de la radiación solar sobre el propio producto, así como en las superficies internas de la cámara de secado. En los secadores solares indirectos, la radiación solar no incide directamente sobre el material a ser secado. El aire es calentado en un colector solar y luego dirigido a la cámara de secado para secar el producto (Kreider SF; Kreith F, 1981). Los secadores indirectos son menos compactos cuando se comparan con los secadores solares directos, pero son generalmente más eficientes. Los Secadores especializados se diseñan normalmente con un producto específico en mente y pueden incluir sistemas híbridos donde también se utilizan otras formas de energía. Dichos sistemas híbridos permiten tener mayores velocidades de secado debido al uso fuentes de energía térmica complementarias a la radiación solar (Rabl, 1985; Mumba, 1995)

Ayensu (1997), estudió la deshidratación de alimentos con un secador solar con flujo de calor por convección, para la construcción de este se utilizaron materiales como madera, metales y las hojas de vidrio, se empleó para secar cultivos alimentarios (yuca, pimienta, okro, cacahuetes, etc.). El colector solar podía transferir 118 W/m² de energía térmica para el secado. Los intercambios térmicos dentro de la secadora se determinaron a partir de un diagrama psicométrico. El aire ambiente a 32 ° C y 80% de humedad relativa (HR) puede ser calentado a 45 °C o 40%. Los cultivos se secaron a un contenido de humedad

final de $<14\%$ y se conservaron durante un período de un año sin deterioro. El proceso de secado pudo ser representado por una ecuación empírica, con variables como el contenido de humedad inicial, el contenido de humedad al pasar el tiempo, y la constante de secado (k). En condiciones idénticas, un alto valor de k se correlacionó con un período de secado más corto.

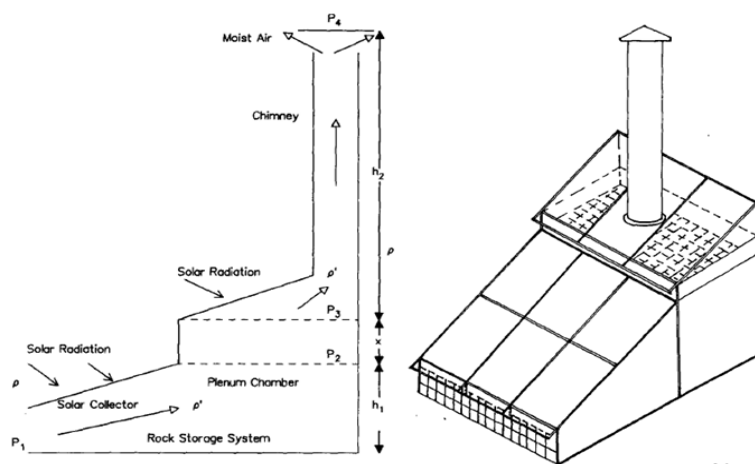


Figura 1. Vista general del Secador Solar

Fuente:(Ayensu, 1997)

Tarigan y Tekasakul (2005) desarrollaron un secador solar integrado con un quemador de biomasa y ladrillos para almacenar calor. El secador fue diseñado para los productores comerciales a pequeña escala de Productos agrícolas en lugares no electrificados. A partir de una serie de pruebas experimentales del sistema, se encontró que la capacidad de la secadora se encontraba entre 60-65 kg de cacahuets con cáscara. En el secador se encontró que la eficiencia del componente solar es del 23%. Mientras que, la eficiencia del quemador fue del 40%. Las características de diseño clave de la

secadora (Figura 2) contribuyeron a producir una eficiencia térmica aceptable y la uniformidad de la temperatura del aire de secado a través de las bandejas.

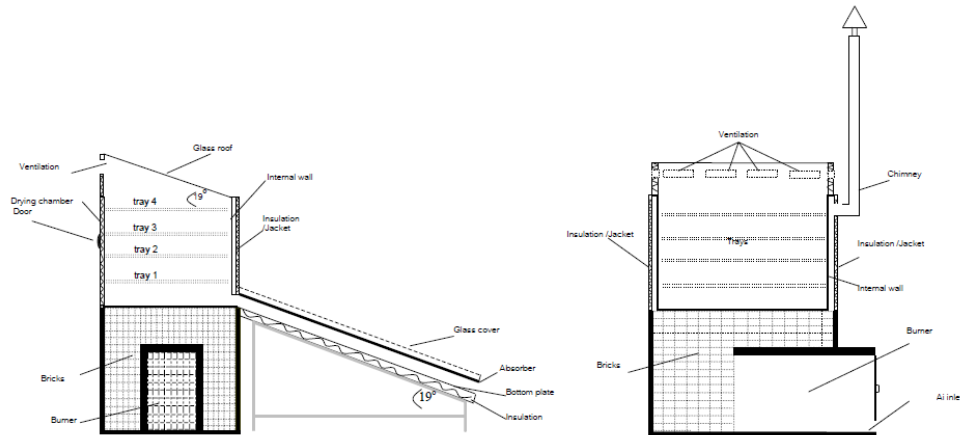


Figura 2. Vista de sección lateral y trasera del secador solar

Fuente: Tarigan y Tekasakul, 2005

Madhlopa y Ngwalo (2005), investigadores de la Universidad de Malawi diseñaron y construyeron un secador solar de convección natural con una masa térmica integrada y quemador auxiliar de aserrín, la secadora se puso a prueba en tres modos de operación de secado, en doce lotes de piña fresca, los modos de operación fueron: solar, biomasa y solar-biomasa, se monitorearon las condiciones meteorológicas durante el proceso de deshidratación, rodajas de piña frescas y secas se analizaron para ver la cantidad de vitamina C y el contenido de cenizas. Los resultados muestran que el modo de energía solar de la operación fue más lento (5 días) en el secado de las muestras, con el modo de biomasa- solar es más rápida (3 días), bajo la meteorología reinante (condiciones que eran generalmente desfavorable entre enero y julio). Las muestras fueron secadas

correctamente incluso en condiciones de lluvia, con el contenido de humedad al pasar de 66,9% a 11% (en base seca) cuando la secadora se hizo funcionar en el modo de la biomasa-solar. Este nivel de contenido de humedad es adecuado para el almacenamiento y la distribución de la fruta (Figura 3).

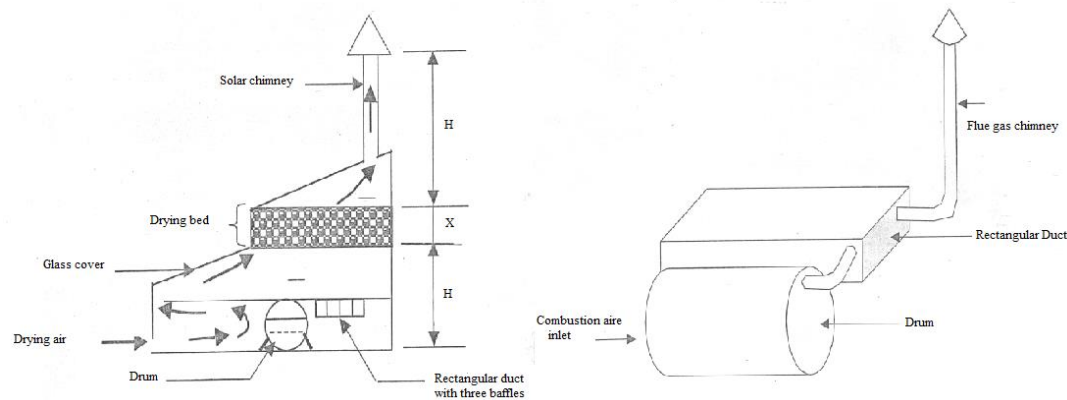


Figura 3. Vista de sección del secador solar y vista de perspectiva del quemador

Fuente: Madhlopa y Ngwalo, 2005

Kirirat y colaboradores (2006) ingenieros mecánicos de la Universidad Príncipe de Songkla diseñaron un secador solar con respaldo de almacenamiento de energía térmica de la combustión de madera el cual fue probado con *Rhinacanthus nasutus*, un tipo de hierba Tailandesa. En este trabajo, se utilizó un colector solar 4x5 m para absorber la radiación solar para el calentamiento del aire entrante durante el día, mientras que un quemador de la biomasa se utilizó para suministrar calor cuando la energía solar no era posible. El calor de la combustión de leña se acumula en el sistema de almacenamiento térmico de ladrillos, y se utiliza para calentar el aire entrante. Los resultados mostraron que la hierba se secó de manera uniforme y la temperatura en el interior de la cámara de

secado se podría mantener por encima de 50°C durante más de 10 horas. La eficiencia térmica cuando se utiliza la energía solar fue de 10,5%, pero el valor era menor que 1% cuando se utiliza el calor de la combustión de biomasa. Esto se dio como resultado del bajo contenido de humedad de los productos después de ser secada con la energía solar (Figura 4).

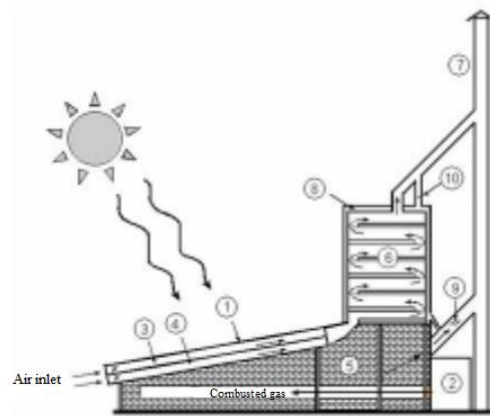


Figura 4. Secador solar con respaldo de almacenamiento de energía térmica

Fuente: Kirirat, et al., 2006

El Centro para el Desarrollo Rural y la Tecnología en Nueva Delhi junto el Instituto Indio de Tecnología, llevaron a cabo una investigación acerca del rendimiento de un sistema híbrido de energía solar y biomasa empleado para secado la planta medicinal, Cúrcuma Long L originaria del continente asiático (Prasad, et al. 2006). El sistema es capaz de generar un adecuado y continuo flujo de aire caliente a temperatura entre 55 y 60°C. El análisis cuantitativo mostró que el secado al sol abierto tomó 11 días para secar

los rizomas, mientras que el secador híbrido sólo necesito 1,5 días y produce productos de mejor calidad. La eficiencia de todo el sistema fue 28,57% (Figura 5)

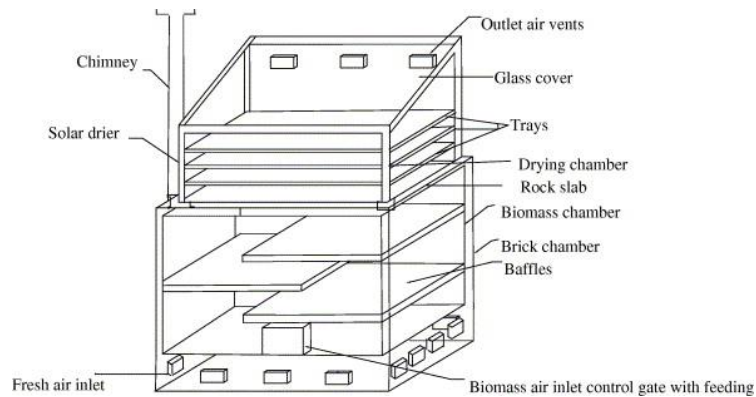


Figura 5. Secador Solar-Biomasa

Fuente: Prasad, et al. 2006

Hace algunos años en Colombia han empleado sistemas híbridos para el secado de sus cultivos agrícolas y flora. En el año 2012 investigadores de la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Kassel en Alemania diseñaron un Secador tipo túnel solar-biomasa para secado de *Mentha Spicata*. Este sistema se diseñó teniendo en cuenta el problema de las diferentes condiciones climáticas. El secador fue diseñado para 24 horas de operación, la energía térmica fue obtenida de la radiación solar durante el día y de la biomasa durante la noche, el área total del colector solar fue de 16 m^2 y el área de secado de 20 m^2 . La capacidad del secador es de 2 a 5 Kg/m^2 dependiendo del producto a secar. El secador opera en una granja cerca de Bogotá, Colombia. La radiación media varía entre 300 y 900 W/m^2 entre las 9:00 a. m. y las 5:00 p. m. Cáscaras de café se

utilizaron como fuente de biomasa. El consumo de energía de la secadora es de 240 W cuando se trabaja con el sistema solar y 260 W cuando funciona con biomasa (Rincon, et al. 2012).

En el departamento de Córdoba la Universidad Pontificia Bolivariana en conjunto de otras entidades diseñó y construyó un secador solar-hibrido para el secado de cascara y pulpa de naranja, la cual al ser mezclada con maíz y soya produce un concentrado para animales a menor costo, con una tecnología limpia que no aumenta el efecto invernadero (Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Energía solar, Centro para el Desarrollo del Hábitat y SENA, 2010). El secador solar híbrido es un sistema diseñado para la captación, almacenamiento y aprovechamiento de la energía solar. Funciona con energía solar, aunque tiene el recurso de hacerlo también con gas propano para los casos extremos en que se acumulen muchos días sin la suficiente energía solar (Figura 6).



Figura 6. Secador híbrido (Solar-Gas propano)

Funete: UPB, Energía solar, Centro para el Desarrollo del Hábitat y SENA, 2010.

1.2. SECADO DE YUCA

La yuca es un cultivo que se produce en todo el mundo, su producción anual es de 170 millones de toneladas y se destaca al continente africano como el de mayor área sembrada y producción obtenida. América latina produce 34 millones de toneladas aproximadamente la quinta parte de la producción mundial con una participación del 18.5%. Por su parte Colombia produce 1.8 millones de toneladas y ocupa el tercer puesto en Latinoamérica después de Brasil y Paraguay. La mayor zona productora de yuca en Colombia es la costa atlántica que participa con el 49% del área cultivada en el país.

Este producto participa en cuatro mercados según los usos principales del mismo: como raíz para consumo humano, como insumo en la industria alimenticia, como producto intermedio en la industria no alimenticia y como materia prima en la industria productora de alimentos balanceados para animales, siendo este último uno de los 2 principales usos que toma cada vez mayor importancia dentro del mercado de este tipo de producto (Martínez, 2003).

El secado de la yuca es el proceso mediante el cual se elimina la mayor parte del agua contenida en las raíces de la planta, para así obtener un producto seco (con un 12-14% de humedad) que se pueda almacenar por un período largo de tiempo (Torregroza, 2013).

1.2.1 Métodos para el secado de yuca

Los métodos de secado más utilizados en la Costa Atlántica son: el secado natural en piso (SNP) y el sistema combinado (natural y artificial); El secado de yuca (en trozos) en pisos de concreto es una tecnología desarrollada en Tailandia, la cual el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, por sus siglas en ingles), en los años 60, adoptó en Colombia (Torregroza, 2013).

El secado natural de la yuca se divide en dos etapas, en la etapa inicial los trozos frescos de yuca pierden humedad rápidamente, desde un 65% en base humedad hasta un nivel de 30 %, en esta etapa es más importante la circulación de aire que la temperatura y la humedad relativa del mismo. En la etapa final la remoción de humedad es lenta y cobra importancia la temperatura y la humedad relativa del aire ambiente (Torregroza, 2013). Las desventajas del SNP son su capacidad y eficiencia bajas, lo que se traduce en periodos más largos de secado en épocas de menor radiación o en épocas de lluvias (Fuentes, et al. 2008).

1.3. COLECTOR SOLAR TÉRMICO

Los colectores de energía solar son dispositivos empleados para obtener la energía térmica útil proveniente de la radiación solar incidente. Ellos pueden ser tipo concentradores o placa plana. Los colectores de concentración de energía térmica operan a temperaturas más altas que los tipos placa plana. Para aplicaciones de secado de cultivos con energía solar, los colectores de placa plana proporcionan las temperaturas

elevadas deseadas y son más apropiados tecno-económicamente que los complejos colectores de concentración. Un simple colector de energía térmica consiste básicamente de una superficie absorbedora, usualmente pintada de negra, la cual absorbe la radiación y transmite ésta en forma de calor al fluido de trabajo, comúnmente agua o aire. Para aplicaciones de secado de cultivos, el aire es usado como fluido de trabajo (Ekechukwu y Norton, 1999).

Los colectores solares planos captan tanto la radiación directa como la difusa y carecen de sistemas de seguimiento de la posición del Sol a lo largo del día. Los elementos básicos que componen un colector solar plano son: cubierta translúcida, placa absorbedora, aislamiento térmico, estructura de soporte, orificios de entrada y salida de aire (Figura 7). La placa captadora se encarga de absorber eficazmente la radiación solar, transformándola en energía térmica utilizable mediante su transferencia a un fluido caloportador. Debe presentar una alta absorptancia, α (cantidad de radiación absorbida en relación a la radiación incidente) y una baja emitancia, ξ (relación entre la radiación energética emitida por una superficie real y la emitida por un cuerpo negro a igual temperatura) (Pérez, 2007).



Figura 7. Colector Solar Térmico

Fuente:(Montero, 2006)

1.4. BIOMASA

Por biomasa se entiende el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma.

Aunque los residuos puedan provenir de cualquier actividad, desde el punto de vista de su posible utilización industrial, los más importantes son los que actualmente se denomina biomasa residual o residuos de origen vital, por cuanto que son renovables, es decir, que son generados año tras año. Esta "biomasa" no es más que materia orgánica no fósil, en la que la radiación solar ha reducido el hidrógeno y el carbono mediante el proceso básico de la fotosíntesis, permitiendo así que pueda tener un aprovechamiento de tipo químico-industrial y, sobre todo, energético. La biomasa, debido a los procesos de conversión a que se ve sometida, origina residuos, considerados así porque en el contexto en que son generados no tienen valor económico alguno (Toscano, 2009).

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, supone unas ventajas medioambientales de primer orden, como son:

- Disminución de las emisiones de azufre y de partículas.
- Emisiones reducidas de contaminantes como CO, HC y NOX.
- Ciclo neutro de CO₂, sin contribución al efecto invernadero.

- Reducción del mantenimiento y de los peligros derivados del escape de gases tóxicos y combustibles en las casas.
- Reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas, evitando su quema en el terreno.
- Posibilidad de utilización de tierras de barbecho con cultivos energéticos.
- Independencia de las fluctuaciones de los precios de los combustibles provenientes del exterior (no son combustibles importados).
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales.
- Estas ventajas convierten a la biomasa en una de las fuentes potenciales de empleo en el futuro, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2007)

1.5. QUEMADORES PARA COMBUSTIBLES SÓLIDOS

Los quemadores para combustibles sólidos pueden ser de varios tipos en función de las dimensiones y la utilización de la caldera. En todos ellos se intenta dar solución a los inconvenientes derivados de la utilización de combustibles sólidos que son el suministro de aire necesario para la combustión y la retirada de los residuos sólidos que se producen.

Los quemadores de parrilla son sistemas de combustión en masa en los que el combustible, generalmente carbón o leña, se vierte sobre una parrilla desde arriba o

procedente de una tolva. El aire necesario para la combustión llega desde abajo forzado o por tiro natural. El grosor que alcanza el lecho de combustible varía en función del tipo de combustible y del tipo de caldera. Este tipo de quemador se utiliza en calderas domésticas o de pequeñas dimensiones.



Figura 8. Quemador de parrilla

Fuente: <http://pcarblog.com/wood-gasifier-furnace-plans/>

1.6. MATERIA DE CAMBIO DE FASE (PCM)

Un material de cambio de fase (Phase Change Materials, PCM) es una sustancia con un alto calor latente que, a la temperatura de cambio de fase, es capaz de almacenar o liberar grandes cantidades de energía. El interés de este tipo de materiales radica en que durante el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante mientras que el material va absorbiendo o liberando grandes cantidades de energía. Este hecho supone una mayor densidad energética de estos materiales en comparación con cualquier otro. La temperatura de cambio de fase es característica de cada PCM (Ramírez, 2009). Entre los

posibles cambios de estado estudiados, el cambio sólido-líquido es el que se presenta como mejor alternativa a considerar (Martínez, 2006)

Para la selección de un material de cambio de fase (PCM) se debe tener en cuenta ciertos criterios relacionados con las propiedades termofísicas, cinéticas y químicas deseadas. Algunas de estas propiedades son:

Propiedades térmicas: Temperatura de fusión en el rango de operación deseado, alto calor latente de transición por unidad de volumen, alto calor específico, alta conductividad térmica de ambas fases.

Propiedades Físicas: Pequeño cambio de volumen en la transformación de fase, baja presión de vapor en la temperatura de operación, fase de equilibrio favorable, fusión congruente del material de cambio de fase, alta densidad.

Propiedades cinéticas: No tenga sobre enfriamientos, alta tasa de nucleación, adecuada tasa de cristalización.

Propiedades químicas: Estabilidad química a largo plazo, ciclo de congelación y fusión completamente reversible, compatibilidad con materiales de construcción, no corrosivos, no tóxicos, no inflamables y no explosivos para garantizar la seguridad.

Economía: Abundante, disponibilidad, costo efectivo.

Un gran número de materiales de cambio de fase sólidos-líquidos (orgánicos, inorgánicos y eutécticos) están disponibles en cualquier rango de temperatura. En la

figura 9 se muestra una clasificación de PCM. Existe una gran cantidad de materiales químicos orgánicos e inorgánicos, los cuales pueden ser identificados como PCM desde el punto de vista de la temperatura de fusión y calor latente de fusión. Sin embargo, excepto por el punto de fusión en el rango de operación, la mayoría de los materiales de cambio de fase no satisfacen el criterio requerido para un adecuado medio de almacenamiento como se mencionó anteriormente (Sharma, et al. 2009)

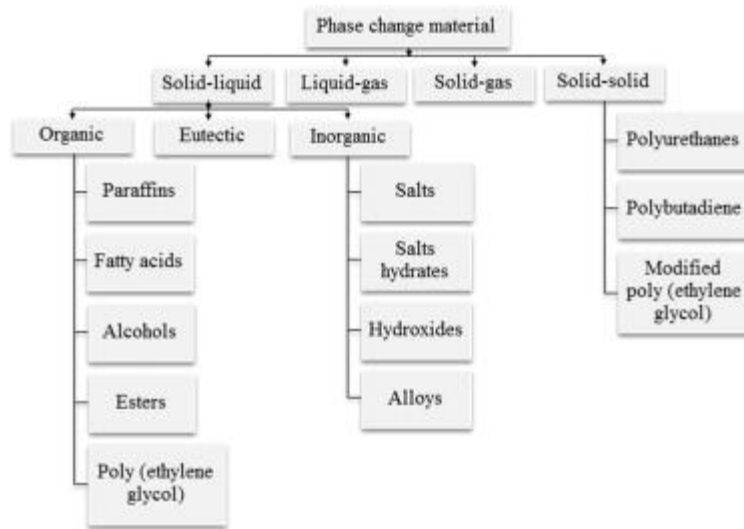


Figura 9. Clasificación de PCMs

Fuente: (Sharma, et al. 2015)

1.6.1. PARAFINAS

La cera de parafina consiste de una mezcla principalmente de cadenas rectas n-alcanos $CH_3 - (CH_2) - CH_3$. La cristalización de la cadena (CH_3) libera una gran cantidad de calor latente. Tanto el punto de fusión y calor latente de fusión incrementan con la longitud de la cadena. La parafina clasifica como material de almacenamiento de calor

de fusión debido a su habilidad en un gran rango de temperatura. La parafina es segura, confiable, predecible, menos costosa y no corrosiva. Son químicamente inertes y estables bajo 500°C, presenta pequeños cambio de volumen en fusión y tienen baja presión de vapor en forma fundida. Por esas propiedades de las parafinas, los sistemas que usan parafina usualmente tienen grandes ciclos de fusión y solidificación (Sharma, et al. 2009). En la tabla 1 se lista propiedades térmicas de algunas parafinas grado técnico.

Tabla 1. Propiedades térmicas de algunas parafinas

No. Of carbons atoms	Melting point (°C)	Latent heat of fusion (kJ/kg)	Group^a
14	5.5	228	I
15	10	205	II
16	16.7	237.1	I
17	21.7	213	II
18	28.0	244	I
19	32.0	222	II
20	36.7	246	I
21	40.2	200	II
22	44.0	249	II
23	47.5	232	II
24	50.6	255	II
25	49.4	238	II
26	56.3	256	II
27	58.8	236	II
28	61.6	253	II
29	63.4	240	II
30	65.4	251	II
31	68.0	242	II
32	69.5	170	II
33	73.9	268	II
34	75.9	269	II

^a Group I, most promising; group II, promising; group III, less promising.

Fuente: (Sharma, et al. 2009)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LA YUCA

Se determinó el porcentaje de humedad inicial de la Yuca Venezolana según el método AOAC 925.10. El cual consistió en tomar diez muestras de 3 g aproximadamente e introducirlas en una estufa a 105 °C durante un tiempo de 8 horas (Anexo 1. Figura A1.1.). Una vez que las muestras fueron retiradas de la estufa se pesaron en una balanza digital ajustada para conocer su masa final y posteriormente se calculó el porcentaje de humedad inicial por diferencia de masa para cada una de las muestras, conociendo de esta forma el contenido de humedad del producto a secar.

2.2. CURVA DE TIEMPO DE SECADO DE LA YUCA, DETERMINADAS EN EL LABORATORIO.

Se realizaron las curvas de tiempo de secado a 50 y 70 °C, las cuales fueron las temperaturas usadas durante la fase experimental con el equipo diseñado. Logrando de esta forma conocer el comportamiento de la humedad a través del tiempo, tener un valor promedio del tiempo de secado a ambas temperaturas y a su vez un patrón de comparación de los resultados obtenidos con el equipo construido. Para ello se tomaron 10 muestras de Yuca variedad venezolana previamente pesadas, se llevaron a una estufa marca Kasai ® y cada 15 minutos fueron sacadas y pesadas en una balanza digital

ajustada (Anexo 3, Figura A3.1). Una vez que la pérdida de masa de las muestras fue disminuyendo, el tiempo para sacar y pesar la muestra se aumentó a 30 minutos y posteriormente 1 hora. Este procedimiento se realizó hasta que las muestras alcanzaron un porcentaje de humedad del 12%, el cual según la literatura se considera que la Yuca está seca (Torregroza, 2013). Finalmente, con los datos de masa y tiempo obtenidos anteriormente se procedió a graficar humedad en base seca vs. tiempo para cada una de las temperaturas de secado.

2.3. SIMULACIÓN TÉRMICA DEL FENÓMENO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL INTERIOR DEL COLECTOR SOLAR.

Se simuló el fenómeno de transferencia de calor dentro de un colector solar de paca plana utilizando la herramienta Simulink de Matlab, para conocer el comportamiento de las temperaturas de los componentes del colector: placa absorbedora, cubierta de vidrio, PCM (parafina) y aire.

En el modelo de simulación se consideró sólo transferencia de calor por convección y radiación, además el aumento de la temperatura a través del tiempo se dio en el siguiente orden: placa absorbedora (P) > cubierta de vidrio > PCM (parafina) > aire, lo que determinó la dirección del flujo de transferencia de calor. También, se tuvo en cuenta los factores de forma de radiación entre los componentes, para ello se asumió un corte transversal a lo largo del colector solar y se usaron las ecuaciones (Anexo 2. Ítem A2.6) para configuraciones en dos dimensiones. Además, se determinó el número óptimo de

haces de tubos para que el flujo de aire de secado fuera turbulento y se asumió que la radiación solar incide sobre la parte superior y la mitad del haz de tubo obteniendo de esta manera el área de transferencia de calor de la parafina para radiación (Anexo 2. Ítem A2.6. Ecuación 6).

Los valores de radiación solar usada en la simulación fueron tomados aleatoriamente de un conjunto de mediciones de radiación solar en la ciudad de Montería realizadas en la Universidad Pontificia Bolivariana entre los meses de enero y mayo del año 2015. Una vez obtenida dicha información, se procedió a realizar un perfil de radiación en Simulink, logrando de esta forma, obtener una simulación que tuviera en cuenta las fluctuaciones de la radiación solar a través del día.

2.4. DISEÑO, ELABORACIÓN DE PLANOS Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AIRE.

Para diseñar y construir el sistema híbrido de calentamiento de aire, se siguió los pasos descritos a continuación:

Se diseñó un colector solar para calentamiento de aire (Anexo 4) con el objetivo de determinar el área del colector y la energía requerida para secar 5 Kg de Yuca variedad venezolana. Se decidió tener dos colectores solares de placa plana de 1.4x0.80 m cuya suma de las áreas fuera igual al área total calculada inicialmente. El aire a calentar fue suministrado por un ventilador centrífugo con un flujo de aire máximo de $3200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Con el fin de tener un sistema de almacenamiento de energía térmica que permitiera aumentar el rendimiento de los colectores, se empleó un material de cambio de fase (PCM) de origen orgánico como es la parafina, la cual se encontraba contenida en latas de aluminio. El número de latas utilizadas fue determinado por medio de la simulación realizada anteriormente.

También se diseñó un quemador de biomasa con intercambiador de calor (Anexo 5), el combustible sólido escogido fue la cascarilla de arroz, la cual posee un alto poder calorífico en comparación con otras biomásas y es de gran producción en el departamento de Córdoba. Se estableció las dimensiones del intercambiador de calor requerido, para ello se determinó el diámetro, longitud de la tubería y el área de transferencia de calor (Anexo 6). El material seleccionado para el intercambiador fue cobre, mientras que la estructura del quemador es de láminas de acero galvanizado.

Una vez finalizada la etapa de diseño se procedió a elaborar los planos de montaje y construcción de los componentes del equipo, con la ayuda del software de diseño asistido por computador, Solidworks 2014 (Anexo 7).

2.5. CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AIRE.

La construcción del equipo se realizó de acuerdo a los planos de diseño (Anexo 7). Los colectores solares fueron contruidos de madera (Roble), mientras que el quemador de

combustible sólido y el secador de productos agrícolas fueron contruidos con láminas de acero galvanizado y malla arrocera.

Las pruebas experimentales se realizaron con 5 kg de Yuca variedad venezolana durante los meses de mayo y junio del año 2015. El sistema se operó de tres modos diferentes: solar, con combustión de biomasa e híbrido. El secado de la Yuca en modo solar e híbrido se llevó a cabo entre las 10:00 am y las 4:00 pm, mientras que con combustión de biomasa las pruebas se realizaron en horas del día en las cuales la radiación solar era mínima o nula, entre 7:00 pm y 1:00 am.

La primera fase experimental se desarrolló en modo solar, para este caso no fue necesario utilizar el quemador de combustible sólido, así que se tuvo una conexión ventilador-colectores solares-secador (Anexo 8. figura A8.5.), además se definió la temperatura optima del aire de secado como 50°C. Se decidió llevar a cabo el secado de la Yuca solo durante horas del día en que la temperatura del aire estuvo por encima de 45°C, es decir, que para dar inicio al secado de la Yuca era esencial que la temperatura del aire que llegaba al secador fuera mayor de 45°C y una vez que se encontrara por debajo de este valor el secado se detenía y la yuca era guardada en bolsas Ziploc para no permitir que absorbiera humedad del ambiente. Lo anterior se hizo con el fin de mantener constante la temperatura del aire durante el mayor tiempo posible y de esta forma garantizar un secado de calidad, a dichas horas de operación se les denominó horas solares.

La segunda fase experimental se realizó con el modo híbrido, en este caso el sistema estuvo compuesto por ventilador- colectores solares-quemador de cascarilla de arroz-secador (Anexo 8. figura A8.6.). La temperatura del aire de secado se fijó como 70°C. Para dar inicio al secado de la Yuca, la primera ignición en el quemador se hizo de manera manual y posteriormente se proporcionó combustible controladamente de tal forma que la temperatura en el interior del secador se mantuviera alrededor de 70 °C. El suministro de la cascarilla también se hizo de forma manual con ayuda de unas bolsas Ziploc previamente pesadas con el fin de conocer la cantidad de cascarilla de arroz que se empleó durante todo el proceso.

La última fase de experimentación fue con el modo de combustión de biomasa, en el cual se tuvo la misma configuración de los componentes que en el modo híbrido (Anexo 8. Figura A8.7.). Para este modo de operación también se definió la temperatura del aire de secado en 70 °C, el combustible que se empleó fue cascarilla de arroz y la ignición inicial junto con el suministro de combustible se realizó manualmente.

Para realizar la curva de tiempo de secado de cada uno de los modos de operación, se secaron 5 kg de Yuca teniendo en cuenta las consideraciones de temperatura mencionadas para cada caso. La primera etapa consistió en la preparación de la Yuca (pelada y picada en trozos de manera manual). Posteriormente se procedió a realizar el montaje de los componentes del sistema dependiendo del modo de operación que se fuera a trabajar, se instalaron los sensores de temperatura y humedad junto con la tarjeta

de adquisición de datos, la cual llevaba los datos de temperatura medidos por los sensores a un computador en donde se graficaban en tiempo real. Finalmente para elaborar las curvas de tiempo de secado, la Yuca fue retirada del secador y pesada en la balanza digital cada 15 min, teniendo de esta forma la pérdida de masa respecto al tiempo, una vez que dicha pérdida de masa fue disminuyendo, el tiempo para retirar y pesar la Yuca se aumentó a 30 min y posteriormente 1 hora hasta que el alimento alcanzó un porcentaje de humedad del 12%. En cada uno de los modos de operación el secado tomó varios días, por lo cual fue necesario guardar la Yuca en bolsas Ziploc una vez terminado cada día de secado con el fin de evitar que las muestras absorbieran humedad del ambiente durante la noche.

Como parámetro de validación, se tomó el tiempo de secado de cada uno de los modos de operación del sistema y se comparó con el tiempo de secado obtenido en el laboratorio para temperaturas de 50°C y 70 °C.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. PORCENTAJE DE HUMEDAD INICIAL Y CURVA DE TIEMPO DE SECADO POR MEDIO DE UNA ESTUFA DE FLUJO ESTÁTICO EN EL LABORATORIO.

El porcentaje de humedad inicial de la Yuca variedad Venezolana fue de $61,88\% \pm 1,03$ (Anexo 9. Tabla A9.1.) y el tiempo promedio de secado requerido para llevar la Yuca a un porcentaje de humedad del 12 % a una temperatura de secado de 50 °C fue de $1282,14 \text{ min} \pm 282,94 \text{ min}$ (Anexo 9. Tabla A9.2.), mientras que a 70 °C fue de $971,5 \text{ min} \pm 18,86 \text{ min}$ (Anexo 9. Tabla A9.3.).

La curva de tiempo de secado a 50 °C evidencio una velocidad de secado constante (rapidez de evaporación constante) hasta las 3 h, y una curva decreciente que se considera como el secado superficial no saturado donde la velocidad de evaporación del agua decrece con el tiempo hasta un valor asintótico en el cual la película superficial del líquido se ha evaporado completamente (Anexo 9. Figura A9.1.). Por su parte, la curva obtenida a temperatura de secado de 70°C presento una velocidad de secado constante de aproximadamente 5 h y un periodo de velocidad de secado decreciente de casi 18 h,

logrando tener un secado homogéneo sin presencia saltos en las gráficas realizadas (Anexo 9. Figura A9.2.)

3.2.SIMULACIÓN TÉRMICA EN LOS COLECTORES SOLARES

La simulación del fenómeno de transferencia de calor determino que después de un tiempo (t) de operación del colector, la placa absorbadora (P) aumentará su temperatura a mayor rapidez, seguido el fluido de trabajo (aire), finalizando con el material de cambio de fase PCM y vidrio, respectivamente, de tal manera que ésta es la dirección de transferencia de calor entre los componentes (Anexo 2, figura A2.2.)

El número óptimo de latas rellenas de parafinas para el banco de tubos fue de 50 en cada colector, cumpliendo con un régimen turbulento del aire de secado tanto para la placa absorbadora como para la cubierta de vidrio, que permitió obtener buenos coeficientes de transferencia de calor (Anexo 10. Tabla A10.1) con el menor tiempo para llegar al estado estacionario (Anexo 10. Figura A10.1; Figura A10.2), presentándose una mayor transferencia de calor de la placa al aire que del aire al vidrio.

Por otra parte para el sistema PCM-Aire se obtuvo un coeficiente transferencia de calor mayor que para los sistemas placa absorbadora-Aire y vidrio-Aire, como era de esperarse pues la principal característica de este tipo de materiales es su capacidad de absorber y liberar grandes cantidades de calor. Sin embargo, de acuerdo a los calores (Q) que se obtuvieron, el componente que mayor energía térmica le proporciona al aire de secado es la placa absorbadora (Anexo 10. Tabla 10.1), debido su alta conductividad

térmica y su mayor capacidad de absorber radiación solar (por pintada de color negro) lo cual permite una mayor diferencia de temperatura entre el sistema placa-Aire, como se evidencia en la simulación la cual mostró que el comportamiento de la temperatura de los componentes del colector solar variaron de acuerdo al nivel de radiación solar incidente en el mismo, obteniéndose la temperatura más alta en la placa absorbedora (60 °C), seguida por la parafina (49 °C), el aire de secado (46 °C) y la cubierta de vidrio (45 °C) (Anexo 10. Figura 10.1), lo cual se verificó durante la fase experimental con el sistema híbrido diseñado.

También se pudo observar que la temperatura de la placa absorbedora fue la que presentó mayores fluctuaciones en el tiempo, ya que al ser un metal va a tener mayor dependencia de la radiación solar que los demás elementos como el vidrio y la parafina. Además, el resultado obtenido en la simulación permitió predecir que el material de cambio de fase (parafina) alcanzaría un estado gomoso (45-50 °C) próximo a su fusión, logrando de esta forma almacenar una cantidad considerable de energía térmica para posteriormente liberarla al aire de secado (Anexo 10. Figura 10.2). La temperatura del aire alcanzó los 48°C, es decir que con el sistema de colectores solares se logró un aumento de 20°C en la temperatura del aire proporcionado por el ventilador en un tiempo aproximado de 1 h y 40 min. Finalmente, se obtuvo el estado estacionario a los 7000 segundos o 2.11 horas (Anexo 10. Figura 10.1), es decir, después de dos horas de operación del equipo bajo condiciones ambientales estables y radiaciones solares promedio en la ciudad de Montería.

3.3. DISEÑO DEL SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AIRE POR COMBUSTIÓN DE BIOMASA Y RADIACIÓN SOLAR PARA SECADO DE YUCA.

El sistema híbrido diseñado está conformado por un ventilador centrífugo, dos colectores solares de placa plana, un quemador de combustible sólido y un secador. A partir de los cálculos realizados en la etapa de diseño se obtuvo un equipo con las siguientes características:

3.3.1. Ventilador centrífugo

El ventilador centrífugo seleccionado para proporcionar el aire de secado con una eficiencia máxima 76%, una velocidad de giro de 920 rpm, un rango de presión estática entre 0-150 Pa y un nivel de ruido menor a 49 dB, acoplado a un motor YDK 300-6D con una potencia de $\frac{3}{4}$ hp con conexión a 220 V, 3.1 A, frecuencia de 50 Hz, para cumplir con el flujo de aire máximo de $3200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Anexo 8, figura A8.1).

3.3.2. Colectores solares de placa plana

El área del colector resulto ser de $2,081 \text{ m}^2$ (Anexo 4. Item A4.1), por efectos de construcción y pensando en futuras investigaciones o experimentaciones a escala de laboratorio, se decidió tener dos colectores solares de placa plana con area $1,12 \text{ m}^2$. Los colectores fueron contruidos de madera (Roble) pintada de negro y el espesor de cada uno de sus lados fue de 2 cm. Cada colector está conformado por una placa absorbadora de aluminio de 0.7 mm de espesor pintada de color negro con el fin de absorber la mayor

cantidad de radiación solar durante el día. Debajo de dicha placa absorbadora se encuentra una lámina de poliestireno expandido (Icopor) de 2 cm de espesor cuya función es aislar el sistema del ambiente. Además, con el propósito de aumentar el rendimiento de los colectores se utilizó dos cubiertas de vidrio transparente de 77x137.1 mm y 4 mm de espesor. Uno de los colectores fue acoplado con el ventilador por medio de ductos de acero galvanizado de 3 pulg (Anexo 8. Figura A8.1) y está conectado en serie con el segundo colector a través de una tubería de PVC de 3 pulg (Anexo 8. Figura A8.2). A su vez, este último colector está unido con el quemador de combustible sólido por medio de un intercambiador de calor que se encuentra en el interior del quemador (Anexo 8. Figura 8.3). Los planos del colector solar se pueden ver en el Anexo 7, Planos Colector Solar 1 al 4.

3.3.3. PCM (Parafina) en los colectores solares.

En el interior de cada uno de los colectores solares se ubicaron 50 latas de aluminio de 330 cm³ rellenas de parafina blanca, dispuestas en forma escalonada. Dicha parafina se utilizó con el objetivo de almacenar la mayor cantidad de energía térmica proveniente de la radiación solar durante el día y liberarla en horas de la noche, logrando temperaturas más altas del aire proporcionado por el ventilador (52 ± 3.46 °C) con una eficiencia de los colectores de 43,91% (Anexo 4. Item A4.1).

3.3.4. Quemador de combustible sólido con intercambiador de calor

El quemador fue diseñado y construido con láminas de acero galvanizado y posee una compuerta con una ventana de vidrio que permite monitorear el estado de la combustión. En el interior del quemador se encuentra un intercambiador de calor que es el encargado de transportar el aire caliente proveniente de los colectores solares hasta el secador. El ducto del intercambiador es de cobre, de 1 1/8 pulg de diámetro y 2.81 m de longitud aproximadamente. Además, el quemador cuenta con un sistema de alimentación por tolva, la cual tiene una capacidad de 900 g de cascarilla de arroz. La ignición inicial se hizo de forma manual y posteriormente se suministraba 400 g de combustible cada vez que era necesario para mantener la temperatura del aire de secado (70 °C). Los residuos sólidos producto de la combustión fueron filtrados por una malla arrocera y desechados en el fondo del quemador para una posterior limpieza a través de una compuerta auxiliar. Los gases producidos fueron evacuados del quemador por medio de una chimenea de 50 x 50 mm de sección transversal y 325 mm de altura (Anexo 5; Anexo 8, Figura A8.3). Los planos del quemador se pueden ver en el Anexo 7, Planos quemador 1 al 5.

3.3.5. Secador de productos agrícolas

El secador es una cabina en forma de túnel de 35 cm de ancho, 20.2 cm de alto y 55 cm de largo. Está construido con láminas de acero galvanizado y cuenta con un difusor en cada extremo que permiten realizar la expansión del aire de secado de forma gradual y aumentar la presión en el interior del recinto. Posee con una bandeja de 5x 30 x 50 cm hecha de malla arrocera con el objetivo que el aire pase a través de todo el alimento

logrando un secado homogéneo. La cabina tiene una compuerta con una ventana de vidrio que permite observar el estado del producto y limpiar los residuos de alimento cuando sea necesario (Anexo 8. Figura A8.4). Los planos del quemador se pueden ver en el Anexo 7, Planos Secador 1 al 3.

También se especifican el soporte del quemador, secador, ventilador, colector, los ductos de empalme del ventilador a colector solar y tubería de unión para colectores en los correspondientes planos de anexo 7. Una fotografía del Sistema híbrido de calentamiento trabajando en modo solar, híbrido y combustión de biomasa se presenta en las Figuras A8.5, A8.6 y A8.7 respectivamente.

Un resumen de las especificaciones técnicas del Sistema híbrido diseñado se muestran en la tabla 2

Tabla 2. Especificaciones técnicas del Sistema híbrido diseñado

Modo de operación	Solar	Híbrido	Combustión de biomasa
Temp. Ambiente (°C)	28		
%HR ambiente	78		
Masa de Yuca secada (kg)	5		
Días de trabajo	6	3	3
Tiempo de secado	19 h 15 min	16 h 45 min	16 h 50 min
Velocidad de secado (kg de agua.h ⁻¹)	0,147	0,170	0,169
Temp. De secado propuesta (°C)	50	70	70
Temp. Prom. Colector 1 (°C)	47±3,13	46±4,73	31±4,46
Temp. Prom. Colector 2(°C)	52±3,46	51±4,44	34±4,22
Temp. Prom. Interior del Secador (°C)	47±3,44	57±11,55	52±15,09
%HR promedio en el secador	28±2,82	24±5,66	34±19,54
Flujo de combustible (kg de cascarilla de arroz.h ⁻¹)		1.34	2.24
Eficiencia de los colectores (%)	43,91	43,91	
Eficiencia del quemador de cascarilla de arroz (%)		36,72	28,18

3.4.VALIDACIÓN DEL EQUIPO DISEÑADO

3.4.1. Operación del equipo en modo solar

El secado en este modo de operación se realizó en 6 días, para 5 kg de Yuca variedad venezolana cuyo contenido de humedad inicial (h_i) era de 62 % y se llevó a una humedad final (h_f) del 12%. En el tiempo de secado se contó sólo con 19 h y 15 min solares, entendiéndose por horas solares todas aquellas horas en las que la radiación solar fue suficiente para proporcionar una temperatura del aire de secado (T_{sec}) mayor o igual a 45 °C. Además, se determinó que en este periodo de tiempo la cantidad de agua retirada fue de 2.84 kg, obteniéndose una velocidad de secado de 0.147 kg de agua.h⁻¹ (Anexo 11).

La temperatura en el interior del secador durante el secado de la Yuca, oscilando entre 40 y 61°C con un promedio de 47±3.44 °C (Anexo 12. Figura A12.1), teniendo una eficiencia de los colectores alrededor del 43,91% (Tabla 2). Además en la misma gráfica se describe la variación de la temperatura del aire de salida del segundo colector, con el fin de apreciar la pérdida de temperatura (aproximadamente 5 °C) que se da una vez que el aire de secado ingresa al secador donde se encuentra ubicada la Yuca picada en trozos y se da un proceso de expansión en el cual se disminuye la temperatura y la velocidad del mismo.

La temperatura alcanzada en el primer colector estuvo en un rango entre 39°C y 54°C, con un promedio de 47±3.13 °C; mientras que en el segundo colector se tuvieron

temperaturas entre 45°C y 61°C, con una media de 52 ± 3.46 °C (Anexo 12. Figura A12.2.). Se pudo observar que la diferencia de temperaturas del aire de secado entre los colectores fue de aproximadamente 5°C, los cuales se atribuyen a la disposición en serie utilizada para los colectores. La temperatura del aire de salida en el segundo colector siempre estuvo por encima de la temperatura del aire de salida en el primero como era de esperarse, ya que en el primer colector se daba un precalentamiento del aire proporcionado por el ventilador y posteriormente en el segundo colector se llevaba dicho aire a la temperatura optima de secado que para este modo de operación (50°C).

También se puede apreciar que la temperatura del aire en el primer colector se mantuvo por debajo de la temperatura de fusión del PCM (55-60 °C) lo cual llevó a que la parafina no cambiara de fase (sólido-líquido) sino que se presentara un ablandamiento observándose una textura gomosa. Por otra parte, la temperatura del aire en el segundo colector estuvo en varias ocasiones por encima de 55°C, el mayor tiempo en el cual se mantuvo dicha temperatura fue aproximadamente 3 h (Anexo 12. Figura A12.2), tiempo que fue suficiente para que la mitad de las latas rellenas de parafina absorbieran la cantidad de energía necesaria para cambiar de estado sólido a líquido y mantenerse en ese estado alrededor de 3 h más, una vez que la temperatura bajó del rango de fusión del PCM. En las demás ocasiones en donde la temperatura del aire superó los 55°C solo por intervalos de minutos, la parafina no se convirtió totalmente líquida sino que se tuvo un cambio de fase sólo en la superficie de la misma.

Durante el secado de la Yuca se observó que tanto en el primer como en el segundo colector las latas que se encontraban más cerca al ventilador no presentaron cambio de fase de la parafina sino que se obtuvo un estado gomoso. Fue por ello que la parafina que se encontraba en el primer colector y la primera mitad del segundo colector no logró tener un cambio de estado por completo, siendo así la parafina más alejada del flujo de aire (segunda mitad del segundo colector) la que cambió de fase de sólido a líquido una vez que alcanzó la temperatura de fusión.

Las curvas de temperatura y humedad del aire presentan una relación inversamente proporcional, en la cual al aumentar la temperatura del aire se presenta un descenso en la humedad relativa y viceversa. El valor máximo de la humedad relativa alcanzada por el aire fue de 37% mientras que el valor mínimo fue de 22%, teniendo de esta forma una humedad promedio de 28 ± 2.82 % (Anexo 12. Figura A12.3), disminuyendo la humedad relativa inicial del aire de 78% a 28%, logrando de esta forma aumentar la capacidad del aire para absorber, almacenar y transportar el agua contenida en la Yuca.

La curva de tiempo de secado obtenida para este modo de operación fue una línea casi recta con pendiente negativa (Anexo 12. Figura A12.4.), que a diferencia de la curva realizada en el laboratorio a 50°C (Anexo 9. Figura A9.1.), sólo cuenta con uno de los dos periodos de velocidades de secado comunes en los productos agrícolas, el periodo de velocidad de secado constante; el periodo de velocidad de secado decreciente no se alcanzó una vez que el contenido de humedad de la Yuca llegó al 12%. Además, se

obtuvo que el tiempo de secado para este modo de operación fue de 19 h y 15 min, es decir, se aumentó el tiempo de secado en 1 h y 50 min en comparación al tiempo que se alcanzó en el laboratorio (aproximadamente 17 h y 25 min).

Respecto a las características físicas de la Yuca después del secado, se puede decir que tuvo una textura y apariencia agradable al ojo humano ya que se mantuvo limpia en comparación con la Yuca secada con los otros modos de operación del equipo (Anexo 15. Figura A15.1.).

3.4.2. Operación del equipo en modo híbrido

Para este modo de operación se controlaba el suministro de cascarilla de arroz para mantener la temperatura de secado en aproximadamente 70°C. El aire de secado a temperatura ambiente (28°C) fue suministrado por el ventilador centrífugo, este aire fue precalentado en el primer colector hasta alcanzar temperaturas máximas y mínimas de 57 y 35 respectivamente, con un promedio de $46 \pm 4.73^\circ\text{C}$. Posteriormente, se continuó calentando el aire en el segundo colector conectado en serie. Logrando un aumento de 5 °C en promedio (Anexo 13. Figura A13.1).

La implementación del quemador trajo consigo un aumento en la temperatura del aire precalentado en los colectores de unos 6°C en promedio, logrando una eficiencia térmica del quemador de alrededor del 36,72%. El suministro de combustible (cascarilla de arroz) se hizo de forma manual durante 3 días donde la radiación solar fue variable,

obteniendo temperaturas en el aire al interior del secador entre 36°C y 97 °C con un promedio de $57 \pm 11.55^{\circ}\text{C}$ (Anexo 13. Figura A13.2.).

Para este modo de operación se secaron 5kg de Yuca variedad venezolana con una humedad inicial del 62%, picada en trozos distribuidos en un área de 0,15 m², hasta llevarla a una humedad del 12%. El tiempo de secado fue de 16 horas y 45 minutos distribuidos en 3 días de funcionamiento del sistema híbrido, obteniendo una velocidad de secado de 0,169 kg.h⁻¹ y un consumo cascarilla de arroz de 4,5 kg de cascarilla de arroz/ kg de yuca húmeda.

En la curva de tiempo de secado graficada se observa la pérdida de masa conforme pasa el tiempo, obteniendo aproximadamente una línea recta con pendiente negativa (Anexo 13. Figura A13.3.). Está a diferencia de la curva realizada en el laboratorio a 70°C (Anexo 9. Figura A9.2), posee solo uno de los dos periodos de velocidades de secado en los productos agrícolas, el periodo de velocidad de secado constante; el periodo de velocidad de secado decreciente no se alcanzó, a pesar de llevar el contenido de humedad de la yuca hasta el 12%.

Con las condiciones de temperaturas alcanzadas al interior del secador se lograron disminuciones en la humedad relativa del aire (78%), llevándolo hasta un $24 \pm 5.66\%$ en promedio, logrando de esta manera que el aire de secado tuviera la mayor capacidad de

extracción de agua en comparación con los otros modos de operación (Anexo 13. Figura A13.4.).

La textura de la Yuca obtenida después del secado es agradable, sin embargo se observó un color amarillento en comparación a la Yuca obtenida en el modo solar, esto debido al aumento de temperatura en el aire de secado (Anexo 15. Figura A15.2.).

3.4.3. Operación del equipo en modo combustión de biomasa

Para este modo de operación se controlaba el suministro de cascarilla de arroz para mantener la temperatura de secado en 70°C y llevar la humedad de 5 kg de Yuca variedad Venezolana desde un 62% hasta un 12 %. Los resultados obtenidos fueron similares a los que se tuvieron en el modo híbrido.

El tiempo de secado obtenido para este modo fue de 16 h y 50 min distribuidos en 3 días de funcionamiento del sistema, aproximadamente igual al tiempo de secado que se tuvo con el modo híbrido (16 horas y 45 minutos), teniendo de esta forma velocidades de secado equivalentes ($0.169 \text{ kg de agua} \cdot \text{h}^{-1}$). Este resultado era de esperarse, ya que la temperatura de secado fue la misma en ambos casos. Las diferencias que presentaron estos dos modos de operación fue el consumo de combustible, siendo mayor el del modo quemador el cual presentó un consumo de 7,56 kg de cascarilla de arroz/ kg de yuca humedad. La eficiencia térmica del quemador fue del 28,18%, esto se debe a que el quemador no contaba con la ayuda de los colectores solares. Se determinó que el flujo

de combustible en modo híbrido fue de 1.34 kg de cascarilla. h^{-1} y para el modo de combustión de biomasa fue de 2.24 kg de cascarilla. h^{-1} .

Durante la experimentación se tuvo que la temperatura del aire a la salida del primer colector varió en un rango entre 26°C y 45°C, teniendo un valor promedio de $31 \pm 4.46^\circ\text{C}$. En el segundo colector la temperatura del aire de salida tuvo un valor mínimo de 27°C, un grado mayor que el primer colector, y un máximo de 47°C, con una media de $34 \pm 4.22^\circ\text{C}$ aproximadamente, es decir, que el aire de secado durante su recorrido a través de los colectores presentó un diferencial de temperatura de 3°C en ausencia de radiación solar; esto se debió a que durante el día el material de cambio de fase que se encontraba dentro de los colectores absorbían suficiente energía térmica proveniente de la radiación solar y la liberaban en horas de la noche (Anexo 14. Figura A14.1.).

Se observó el comportamiento de la temperatura en el interior del secador y se comparó con la temperatura del aire de salida del segundo colector (Anexo 14. Figura A14.2). En la gráfica se evidencia el desfase entre la temperatura promedio alcanzada por el aire una vez finalizado su paso por los colectores (34°C) y la temperatura en el interior del secador con presencia de la Yuca (52°C). Para la primera temperatura se tuvo una línea con variaciones producto de las condiciones climatológicas en la ciudad de Montería, mientras que la temperatura en el interior del secador no presentó un comportamiento determinado ni un tiempo de estabilización, sino grandes fluctuaciones debido a que el suministro de cascarilla se hizo de forma manual sin tener ningún control del mismo.

En esta fase experimental se tuvo humedades relativas mayores puesto que las pruebas se llevaron a cabo en horas de la noche cuando la humedad del ambiente era mayor debido a las bajas temperaturas en comparación con las del día. Dichas humedades estuvieron entre 13 % y 92% con un promedio del $33,88 \pm 19,53$ (Anexo 14. Figura A14.3.) Similarmente a los modos anteriores se observa que las curvas de temperatura y humedad del aire presentan una relación inversamente proporcional, en la cual al aumentar o disminuir la temperatura del aire se presenta un descenso o ascenso en la humedad relativa del mismo.

La curva de tiempo de secado obtenida para el modo combustión de biomasa (Anexo 14. Figura A14.4.), fue una línea irregular con pendiente negativa durante todo el tiempo de funcionamiento del sistema, lo cual quiere decir que en el secado realizado solo estuvo presente el periodo de velocidad de secado constante. También se tuvo que el tiempo de secado de la Yuca en este modo de operación fue de 16 h y 50 min, comparado con el tiempo obtenido en el laboratorio a 70°C (16 h y 12 min) presentó un aumento de 38 min, el cual es un desfase aceptable teniendo en cuenta que la temperatura de secado presento variaciones a lo largo del tiempo que tardó el proceso de secado.

Respecto a las condiciones físicas de la Yuca secada, se puede decir que el producto obtenido presentó en su superficie una suciedad propia de los gases de combustión generados durante el secado. Este resultado se comparó con la Yuca secada anteriormente logrando percibir un color más oscuro para el producto obtenido en el

modo combustión de biomasa, seguido por los modos híbridos y solar, respectivamente (Anexo 15. Figura A15.3.).

4. CONCLUSIONES

- Bajo las mismas condiciones de flujo de aire el tiempo de secado de la yuca variedad venezolana, disminuye en un 32 % cuando se aumenta su temperatura de secado de 50°C a 70 °C.
- Las curvas de tiempo de secado obtenidas en el laboratorio a 50 °C y 70°C evidenciaron una velocidad de secado constante hasta 3 y 5 horas respectivamente, después de la cual la curva fue decreciente.
- En la simulación, se obtuvo que la placa absorbidora fue el componente que mayor energía térmica le transfirió al aire ya que presentó mayores temperaturas durante el secado de la Yuca, seguido de la parafina y la cubierta de vidrio.
- Los resultados obtenidos en la simulación predecían que la temperatura del aire a la salida de los colectores alcanzarían un valor de 46 °C para un día normal de radiación solar en la ciudad de Montería, lo cual se comprobó durante la validación del equipo en los modos solar e híbrido.
- Con la disposición en serie utilizada para los colectores solares permitió un aumento de 5 °C la temperatura del aire de secado proveniente del primer colector.

- El tiempo de secado para el modo solar fue de 19 h y 15 min, es decir, se aumentó el tiempo de secado en 1 h y 50 min en comparación al tiempo que se alcanzó en el laboratorio (aproximadamente 17 h y 25 min).
- El tiempo de secado para los modos de operación híbrido y biomasa fueron aproximadamente iguales (16 h y 50 min), los cuales presentaron un aumento de 38 min comparado con el tiempo obtenido en el laboratorio a 70°C (16 h y 12 min).
- Las temperaturas alcanzadas en el interior del secador en modo solar fueron menores (47 ± 3.44 °C) que en los modos de combustión de biomasa e híbrido (52 ± 15.09 °C y 57 ± 11.55 °C respectivamente), sin embargo dicha temperatura presentó una mayor estabilidad durante el tiempo de secado en comparación las otras dos.
- Las eficiencias de los colectores solares en los modos de operación solar e híbrido fueron aproximadamente iguales (43,91 %). Mientras que para el quemador de cascarilla de arroz la eficiencia en los modos de operación híbrido y combustión de biomasa fueron de 28,18% y 36,72% respectivamente.
- Los resultados obtenidos durante la validación del equipo muestran que las temperaturas en los tres modos de operación tuvieron muchas fluctuaciones a lo largo del tiempo de secado, lo cual difiere del resultado conseguido en la simulación en donde se tuvo comportamientos estables de las temperaturas y un tiempo de estabilización del sistema.
- La humedad relativa del aire en el interior del secador durante la experimentación fue menor para el modo de operación híbrido puesto que las temperaturas alcanzadas en el secador fueron mayores.

- Con el secado en modo combustión de biomasa y en modo híbrido se obtuvo aproximadamente el mismo tiempo de secado (16 h y 45 min), siendo estos 2 h y 30 min menor que el tiempo obtenido en el modo solar.
- Las velocidades de secado obtenidas durante la experimentación fueron similares para el modo híbrido y de combustión de biomasa (0.170 y 0.169 kg de agua.h⁻¹ respectivamente) mientras que para el modo solar se tuvo una velocidad de secado menor (0.147 kg de agua.h⁻¹).
- La Yuca secada en modo solar tuvo una mejor apariencia que la Yuca obtenida en los otros dos modos de operación, ya que presentó una mejor textura y menores suciedades en su superficie, sin embargo para éste modo fueron necesarios más días de trabajo.
- El modo de operación solar es el más económico puesto que no requiere uso de combustible, sin embargo cuando el equipo operó en este modo fueron necesarias 19,25 horas solares que se reflejaron en 6 días de trabajo, mientras que con los otros dos modos se necesitó menos tiempo para el secado distribuidos en 3 días.
- El funcionamiento del equipo en modo híbrido es una mejor opción que en modo combustión de biomasa, ya que el tiempo de secado es aproximadamente igual, pero el consumo de cascarilla de arroz menor en modo híbrido que en modo biomasa.

5. RECOMENDACIONES

- Las variaciones de las temperaturas en el interior de la cámara de secado durante los modos de operación híbrido y biomasa, son debido a los cambios en el calor aportado por el quemador de biomasa, consecuencia de la alimentación manual del combustible (cascarilla de arroz), de esta manera se recomienda la implementación de un sistema automático de dosificación de cascarilla de arroz para obtener temperaturas estables en el aire de secado.
- Otro aspecto importante dentro del quemador de cascarilla de arroz es el encendido inicial del combustible, el cual se hizo de forma manual con la ayuda de productos inflamables y cerillos, tornándose peligroso y demorado. Esto se pudo solucionar con la instalación de mecanismos de encendido mecánico que realicen la ignición inicial.
- La entrada de aire caliente al secador de productos agrícolas se hace por medio de un tubo de cobre al inicio del secador, esto causa el secado prematuro de los productos que se encuentran cerca de esta salida de aire caliente, por esta razón se recomienda instalar tuberías por todo el secador que distribuyan el aire de secado para obtener una cámara de secado con temperaturas y flujos relativamente homogéneos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- AYENSU, A., 1997. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. *Solar Energy*, **59**(4–6), pp. 121-126.
- EKECHUKWU, O. and NORTON, B., 1999. Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Conversion and Management*, **40**(6), pp. 657-667.
- EKECHUKWU, O.V., 1999. Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion and Management*, **40**(6), pp. 593-613.
- FOSTER, G.H., MCKENZIE, B.A. and DEFOREST, S., 1980. *Solar heat for grain drying: Selection, performance, management*. Purdue University, Cooperative Extension Service.
- FUENTES, J., HERNÁNDEZ, I. and PÉREZ, F., 2008. *Secado de yuca con energía solar y otras fuentes de calor por convección forzada*. Universidad de Sucre. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería agrícola.
- INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA, 2007. *Energía de la Biomasa*. Madrid, España.

- KIRIRAT, P., PRATEEPCHAIKUL, G., NAVASUT, J., NAKORN, N.N. and TEKASAKUL, P., 2006. Drying of *Rhinacanthus nasutus* (Linn.) Kurz. using a solar dryer incorporated with a backup thermal energy storage from wood combustion. *Songklanakarin J.Sci.Technol*, **28**(3), pp. 563-573.
- KREIDER SF and KREITH F, eds, 1981. *Solar energy handbook*. New York, USA: McGrawHill Book.
- MADHLOPA, A. and NGWALO, G., 2005. *Convective solar dryer with a wood waste backup heater for dehydration of food*. Zomba, Malawi.
- MARTÍNEZ, A., 2003. *Seminario la yuca como componente de la cadena avícola*.
- MARTÍNEZ, V.A.R., 2006. Comparación de sistemas de climatización para vivienda unifamiliar basados en materiales de cambio de fase frente a sistemas convencionales. *Proyecto fin de carrera. Madrid*.
- MONTERO PUERTAS, I., 2006. Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos.
- MUMBA, J., 1995. Development of a photovoltaic powered forced circulation grain dryer for use in the tropics. *Renewable Energy*, **6**(7), pp. 855-862.
- PÉREZ DE LOS REYES, 2007. *Aplicaciones de la energía solar al tratamiento térmico de suelos de invernadero*. Argentina: Universidad de Córdoba, Ingeniería Gráfica e Ingeniería y Sistemas de Información Cartográfica.

- PRASAD, J., VIJAY, V.K., TIWARI, G.N. and SORAYAN, V.P.S., 2006. Study on performance evaluation of hybrid drier for turmeric (*Curcuma longa* L.) drying at village scale. *Journal of Food Engineering*, **75**(4), pp. 497-502.
- RABL, A., 1985. *Active solar collectors and their applications*. Oxford University Press.
- RAMÍREZ, A., 2009. *Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- RATTI, C. and MUJUMDAR, A.S., 1997. Solar drying of foods: Modeling and numerical simulation. *Solar Energy*, **60**(3–4), pp. 151-157.
- RINCON, S., CUERVO, P. and HENSEL, O., 2012. Drying of *Mentha spicata* in a Dual Solar-Biomass Tunnel Dryer in Colombia. *Universidad Nacional de Colombia*.
- SHARMA, A., CHEN, C.R. and VU LAN, N., 2009. Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(6–7), pp. 1185-1210.
- SHARMA, A., TYAGI, V.V., CHEN, C.R. and BUDDHI, D., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **13**(2), pp. 318-345.
- SHARMA, R.K., GANESAN, P., TYAGI, V.V., METSELAAR, H.S.C. and SANDARAN, S.C., 2015. Developments in organic solid–liquid phase change

materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, **95**, pp. 193-228.

- TARIGAN, E. and TEKASAKUL, P., 2005. A mixed-mode natural convection solar dryer with biomass burner and heat storage back-up heater, *Proceedings of the Australia and New Zealand Solar Energy Society Annual Conference 2005*, pp. 1-9.
- TORREGROZA ESPINOSA, A.M., 2013. *Determinacion de la influencia de la temperatura y velocidad del aire sobre las cineticas de secado de tres variedades de yuca procesadas en la planta instalada en la vereda los algarrobos*. Berastegui, Córdoba: Universidad de Córdoba.
- TOSCANO MORALES, L.A., 2009. *Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa (Aplicación a biomasas locales típicas)*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP), 1988. *Environmental Perspective to the year 2000 and beyond*. . Peshurst Press Ltd, Kent, pp. 13-16.
- UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA (UPB), ENERGÍA SOLAR, CENTRO PARA EL DESARROLLO DEL HÁBITAT Y SENA, 2010. *Alimento para animales desde un secador solar*. Montería, Córdoba

ANEXOS

ANEXO 1: EQUIPOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR LA HUMEDAD DE LA YUCA POR EL MÉTODO AOAC 925.10.



Fuente propia, 2015.

Figura A1.1. Equipo de secado y balanza analítica para determinar humedad de la yuca

ANEXO 2: CÁLCULOS DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA EN EL INTERIOR DE LOS COLECTORES SOLARES.

A2.1 Balances de energía para cada componente:

A2.1.a. Balance de energía para el aire

$$\begin{aligned} & \rho_1 q_{aire,1} C_p T_1(t) + h_{p,A} A_{p,A} (T_p(t) - T_2(t)) + h_{v,A} A_{v,A} (T_v(t) - T_2(t)) \\ & + h_{PCM,A} A_{PCM,A} (T_{PCM}(t) - T_2(t)) - \rho_2 q_{aire,2} C_p T_2(t) \\ & = \rho_A v_A C_{v,A} \frac{dT_2(t)}{dt} \end{aligned}$$

A2.1.b. Balance de energía para el PCM

$$\begin{aligned} & \alpha_{aluminio} A_{PCM}^{(r)} I_{rad} + F_{(P,PCM)} \varepsilon_P \sigma A_{P,A} (T_P(t)^4 - T_{PCM}(t)^4) \\ & + F_{(v,PCM)} \varepsilon_v \sigma A_v (T_v(t)^4 - T_{pcm}(t)^4) - h_{PCM,A} A_{PCM,A} (T_{PCM}(t) - T_2(t)) \\ & = \rho_{PCM} v_{PCM} C_{v,PCM} \frac{dT_{PCM}(t)}{dt} \end{aligned}$$

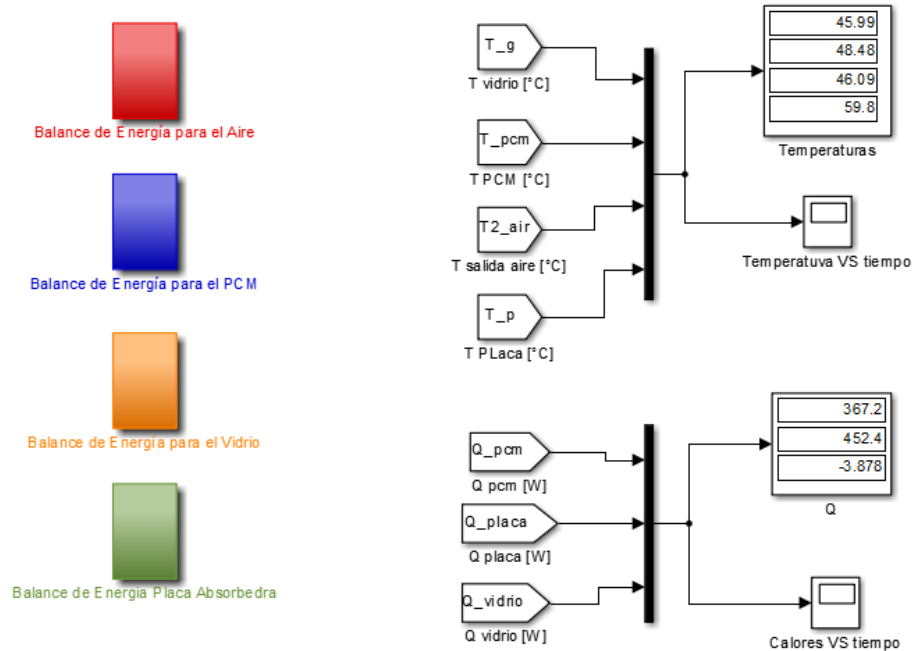
A2.1.c. Balance de energía para el vidrio

$$\begin{aligned} & F_{(P,v)} \varepsilon_P \sigma A_P (T_P(t)^4 - T_v(t)^4) - F_{(v,PCM)} \varepsilon_v \sigma A_v (T_v(t)^4 - T_{pcm}(t)^4) \\ & - h_{v,A} A_{v,A} (T_v(t) - T_2(t)) = \rho_v v_v C_{v,vidrio} \frac{dT_v(t)}{dt} \end{aligned}$$

A2.1.d. Balance de energía para la placa absorbadora

$$\begin{aligned} & \alpha_{aluminio} A_P^{(r)} (I_{rad}) - F_{(P,v)} \varepsilon_P \sigma A_P (T_P(t)^4 - T_v(t)^4) \\ & - F_{(P,PCM)} \varepsilon_P \sigma A_P (T_P(t)^4 - T_{PCM}(t)^4) - h_{P,A} A_{P,A} (T_P(t) - T_2(t)) \\ & = \rho_{aluminio} v_p C_{v,placa} \frac{dT_P(t)}{dt} \end{aligned}$$

A2.2 Esquema de solución de los balances de energía planteados con la herramienta Simulink de Matlab y resultados.



A2.3. Valores numéricos de las variables para simulación y diseño

b : Base de la placa absorvedora = 0,76 m

l : Longitud de la placa absorvedora = 1,36 m

e_p : Espesor de la placa absorvedora = 0,0007 m

h : Altura del colector = 0,14 m

e_v : Espesor de la cubierta de vidrio = 0,004 m

D : Diámetro de la lata de aluminio = 0,065 m

L : Altura de la lata de aluminio = 0,115 m

ρ_1 : Densidad del aire a temperatura promedio ($T=40^\circ\text{C}$) = 1,127 kg. m⁻³

ρ_A : Densidad del aire a temperatura de película = 1,1057 kg. m⁻³

ρ_{PCM} : Densidad de la parafina = 916 kg. m⁻³

ρ_v : Densidad del vidrio = 2800 kg. m⁻³

$\rho_{aluminio}$: Densidad del aluminio = 2702 kg. m⁻³

$q_{aire,1}$: Flujo de aire entrante= 0.04 m³. s⁻¹

v_A : Volumen de aire en el colector = 0,1256 m³

v_{PCM} : Volumen de la parafina= 0,01908 m³

v_v : Volumen de la cubierta de vidrio = 0,004134 m³

v_p : Volumen de la placa absorbidora= 0,0007235 m³

C_p : Calor específico del aire a presión constante = 1007 J.kg⁻¹.°C⁻¹

$C_{v,A}$: Calor específico del aire a volumen constante = 1007 J.kg⁻¹.°C⁻¹

$C_{v,PCM}$: Calor específico de la parafina a volumen constante = 2130 J.kg⁻¹.°C⁻¹

$C_{v,vidrio}$: Calor específico del vidrio a volumen constante = 750 J.kg⁻¹.°C⁻¹

$C_{v,placa}$: Calor específico del aluminio a volumen constante = 903 J.kg⁻¹.°C⁻¹

T_1 : Temperatura del aire de entrada en estado estable = 28°C

$T_1(t)$: Temperatura del aire de entrada en estado transitorio [°C]

T_2 : Temperatura del aire de salida o temperatura de secado en estado estable = 50°C

$T_2(t)$: Temperatura del aire de salida o temperatura de secado en estado transitorio [°C]

$\frac{dT_2(t)}{dt}$: Variación de la temperatura de salida respecto al tiempo [°C. s⁻¹]

$\frac{dT_{PCM}(t)}{dt}$: Variación de la temperatura de la parafina respecto al tiempo [°C. s⁻¹]

$\frac{dT_v(t)}{dt}$: Variación de la temperatura del vidrio respecto al tiempo [°C. s⁻¹]

$\frac{dT_P(t)}{dt}$: Variación de la temperatura de la placa respecto al tiempo [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$]

T_P : Temperatura de la placa en estado estable = 60°C

$T_P(t)$: Temperatura de la placa en estado transitorio [$^{\circ}\text{C}$]

T_v : Temperatura del vidrio en estado estable = 58°C

$T_v(t)$: Temperatura de la cubierta de vidrio en estado transitorio [$^{\circ}\text{C}$]

T_{PCM} : Temperatura de la parafina en estado estable = 55°C

$T_{PCM}(t)$: Temperatura de la parafina en estado transitorio [$^{\circ}\text{C}$]

$h_{P,A}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa y el aire = $24,09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

$h_{v,A}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el vidrio y el aire = $24,18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

$h_{PCM,A}$: Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la parafina y el aire = $114,72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

$A_{P,A}$: Área de transferencia de calor entre la placa y el aire = $0,8677 \text{ m}^2$

$A_{v,A}$: Área de transferencia de calor entre el vidrio y el aire = $1,0336 \text{ m}^2$

A_V : Área del vidrio = $1,0336 \text{ m}^2$

$A_{PCM,A}$: Área de transferencia de calor entre la parafina y el aire = $1,34 \text{ m}^2$

$A_{PCM}^{(r)}$: Área de radiación incidente sobre la parafina = $0,753 \text{ m}^2$

$A_P^{(r)}$: Área de radiación incidente sobre la placa = $0,8677 \text{ m}^2$

$\alpha_{aluminio}$: Absortividad del aluminio = $0,95$

I_{rad} : Perfil de radiación solar en Montería, Colombia [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

$F_{(P,PCM)}$: Factor de forma entre la placa y la parafina = 0,0405

$F_{(v,PCM)}$: Factor de forma entre el vidrio y la parafina = 0,0405

$F_{(P,v)}$: Factor de forma entre la placa y el vidrio = 0,9023

ε_P : Emisividad del aluminio = 0,95

ε_v : Emisividad del vidrio = 0,90

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$

P : Presión = 100 Kpa

R : Constantes de los gases ideales = $0,2870 \text{ Kpa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

D_h : Diámetro hidráulico del colector solar = 0,2364 m

$Re_{D,pcm}$: Reynold parafina = 79675,58

Re_p : Reynold placa absorbadora = $5,051 \times 10^5$

Re_v : Reynold cubierta de vidrio = $5,1075 \times 10^5$

V : Velocidad mínima del aire para flujo turbulento = $6,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

V_{max} : Velocidad máxima en el bando de tubos = $11,47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

D_h : Diámetro hidráulico del colector solar = 0,2364 m

S_T : Distancia vertical entre centros de PCM = 0,15 m

S_L : Distancia horizontal entre centros de PCM = 0,12 m

F : Factor de corrección para bancos de tubos con menos de 16 filas = 0,9833

N_{uD} : Número de Nusselt = 284,89

$N_{uD,Nl}$: Número de Nusselt corregido = 280,13

Propiedades del aire a temperatura de película $t_f = \frac{t_s + t_\alpha}{2} = \frac{60 + 28}{2} = 44 \cong 45^\circ C$ para el

cálculo de $h_{p,A}$

k : Conductividad térmica = $0,02699 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

ν : Viscosidad cinemática = $1,750 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

P_r : Número de Prandtl = 0,7241

A2.4. Propiedades del aire para el cálculo de $h_{v,A}$

Temperatura de película $t_f = \frac{t_s + t_\alpha}{2} = \frac{58 + 28}{2} = 43^\circ C$

k : Conductividad térmica = $0,026842 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

ν : Viscosidad cinemática = $1,7308 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

P_r : Número de Prandtl = 0,72466

A2.5. Propiedades del aire para el cálculo de $h_{pcm,A}$

Temperatura media $t_m = \frac{t_i + t_e}{2} = \frac{28 + 50}{2} = 39 \cong 40^\circ C$

k : Conductividad térmica = $0,02662 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

ν : Viscosidad cinemática = $1,702 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

P_r : Número de Prandtl = 0,7255

P_{rS} : Número de Prandtl @ $T_s = 55^\circ C$ = 0,7215

A2.6 Ecuaciones empleadas para los cálculos de la simulación térmica:

$$A_{P,A} = (b \times l) - n \left[\frac{\pi}{4} D^2 \right] \quad (1)$$

$$A_{V,A} = b \times l \quad (2)$$

$$A_{PCM,A} = n \left[\frac{\pi}{4} D^2 + \pi D L \right] \quad (3)$$

$$\text{Ecuación de los gases ideales } \rho_2 = \frac{P}{RT_2} \quad (4)$$

$$v_A = (b \times l \times h) - \left(\frac{\pi}{4} D^2 L \right) n \quad (5)$$

$$A_{PCM}^{(r)} = n \left[\frac{\pi}{4} D^2 + \frac{\pi}{2} D L \right] \quad (6)$$

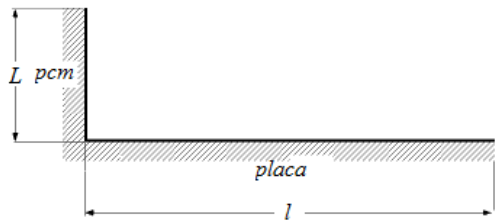
$$v_{PCM} = \left(\frac{\pi}{4} D^2 L \right) n \quad (7)$$

$$v_v = b \times l \times e_v \quad (8)$$

$$v_p = b \times l \times e_p \quad (9)$$

Para el cálculo de los factores de forma, se asumirá un corte transversal en el colector solar y se usaran las ecuaciones para configuraciones en dos dimensiones. Se observa que $F_{(P,PCM)} = F_{(v,PCM)}$

Placas contiguas largas



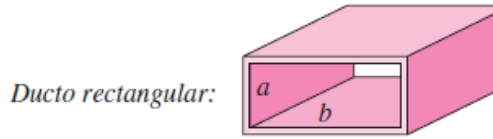
$$F_{(P,PCM)} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{L}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{L}{l} \right)^2} \right\} \quad (10)$$

Placas paralelas del mismo ancho



$$F_{(P,v)} = \sqrt{1 + \left(\frac{h}{l}\right)^2} - \frac{h}{l} \quad (11)$$

Placas Ducto rectangular



$$D_h = \frac{2ab}{a+b} = \frac{2bh}{b+h} \quad (12)$$

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (13)$$

$$Re_{D,pcm} = \frac{V_{max} \left(\frac{D_h}{2} \right)}{\nu} \quad (14)$$

$$Nu_{uD,pcm} = 0,35 \left(\frac{S_T}{S_L} \right)^{0,2} Re_D^{0,6} Pr_{@T=40^\circ C}^{0,36} \left(\frac{Pr_{@T=40^\circ C}}{Pr_{@T=55^\circ C}} \right)^{0,25} \quad (15)$$

$$Nu_{uD,NL} = F Nu_D \quad (16)$$

$$h_{pcm,A} = \frac{Nu_{D,NL} k_{@T=40^\circ C}}{D} \quad (17)$$

$$Re_p = \frac{VL}{\nu_{@T=45^\circ C}} \quad (18)$$

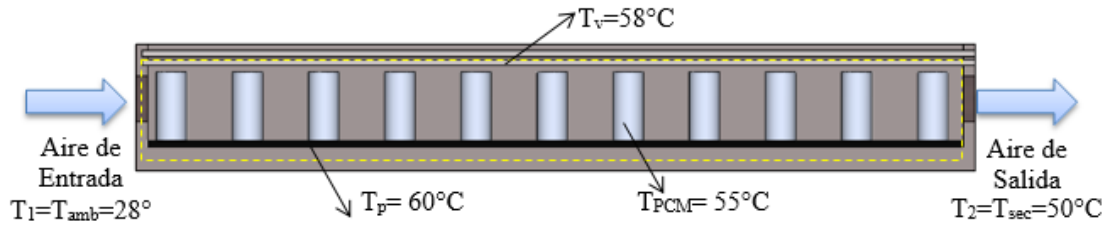
$$Nu_p = 0,037 Re_p^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (19)$$

$$h_{p,A} = \frac{Nu k_{@T=45^\circ C}}{L} \quad (20)$$

$$Re_v = \frac{VL}{\nu_{@T=43^\circ C}} \quad (21)$$

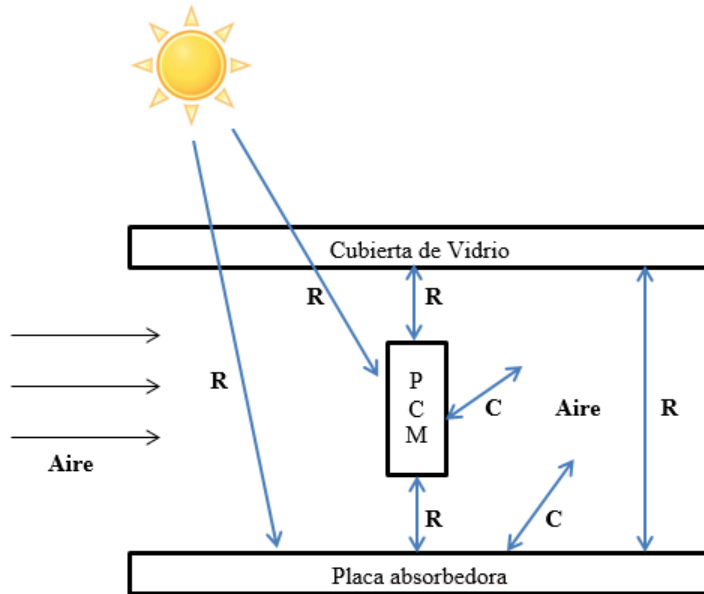
$$Nu_v = 0,037 Re_v^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (22)$$

$$h_{v,A} = \frac{Nu k_{@T=43^\circ C}}{L} \quad (23)$$



Fuente propia, 2015.

Figura A2.1. El volumen de control a estudiar en la simulación.



R: Indica transferencia de calor por radiación

C: Indica transferencia de calos por convección

Fuente propia, 2015.

Figura A2.2. Esquema de las direcciones de transferencia de calor junto con la forma de transferencia (convección o radiación) que se presenta entre los componentes del sistema.

ANEXO 3: EQUIPOS PARA REALIZAR LA CURVA DE TIEMPO DE SECADO A 50 Y 70 °C EN EL LABORATORIO.



(a)



(b)



(c)

Fuente propia, 2015.

Figura A3.1. (a) estufa (b) parilla con yuca..... (c) balanza

ANEXO 4: CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS COLECTORES SOLARES.

A4.1. Valores numéricos de las variables

m_p : Masa de yuca a secar = 5 kg

M : Humedad inicial = 62%

M_f : Humedad final = 12%

m_w : Masa de agua a retirar = 2,840909091

M_{fs} : Humedad final en base seca = 0,136363636

a_w : Actividad del agua = 0,555570659

ERH : Humedad relativa de equilibrio = 55,55706588%

$t_d = t_s$: Tiempo de secado = 20 hr

m_{dr} : Velocidad promedio de secado = 0,142045455 kg. Hr⁻¹

T_{amb} : Temperatura ambiente promedio = 28°C

HR_{amb} : Humedad relativa promedio = 78%

h_i : Entalpía inicial del aire = 75,74 KJ. Kg de aire seco⁻¹

w_i : Humedad inicial del aire = 0,01865 kg de H₂O. kg de aire seco⁻¹

T : Temperatura de secado = 50°C

h_f : Entalpía final del aire = 98,6 KJ. Kg de aire seco⁻¹

w_f : Humedad final del aire = 0,02349 kg de H₂O. kg de aire seco⁻¹

\dot{m} : Flujo másico de aire = 29,34823441 kg de aire. hr⁻¹

E : Energía requerida para evaporar el agua = 0,186361289 KW

ρ_{aire} : Densidad del aire a la temperatura de la película (40°C) = 1,127 kg. m⁻³

\dot{V} : Flujo volumétrico de aire requerido = 26,04102432 m³. hr⁻¹

$F'(\tau\alpha)$: Eficiencia del colector = 0,3

α : Absortividad de aluminio aleado = 0,95

τ : Transmisividad del vidrio = 0,93

n : Numero de cubiertas = 2

ρ : Refractancia difusa para n cubiertas = 0,24

$(\tau\alpha)$: Producto de la Absortividad y la Transmisividad para n cubiertas = 0,894230769

T_{eco} : Temperatura del aire a la entrada del colector = 28°C

T_{sco} : Temperatura del aire a la salida del colector = 50°C

G_T : Radiación solar promedio en córdoba = 500 W. m⁻²

C_p : Calor específico del aire a la temperatura de la película (40°C) = 1007 J. kg⁻¹. °C⁻¹

F' : Factor de corrección = 0,335483871

V_a : Velocidad del aire = 7,2 km. hr⁻¹

S_c : Separación entre la placa absolvedora y los vidrios = 0,11 m

T_p : Temperatura de la placa absolvedora = 60°C

T_v : Temperatura del vidrio = 58°C

T_a : Temperatura ambiente = 28°C

T_c : Temperatura del cielo = 28°C

L_p : Ancho del colector = 0,76 m

h_{rvc} : Coeficiente por radiación entre la cubierta de vidrio y el cielo = 6,59 W. m⁻². °C⁻¹

Re_L : Número Reynolds = 9,44E4

N_u : Número Nusselt = 307,245

K_a : Conductividad térmica del aire = 0,0259 W. m⁻¹. °C⁻¹

h_{cva} : Coeficiente de convección entre la cubierta y el aire ambiente = 10,47 W. m⁻². °C⁻¹

ε_v : Emisividad del vidrio = 0,92

ε_p : Emisividad de la placa absolvedora = 0,91

h_{rpv} : Coeficiente de calor por radiación entre la placa absolvedora y la cubierta = 6,99 W. m⁻². °C⁻¹

T_f : Temperatura media entre la placa absolvedora y el vidrio = 59°C

β_a : Coeficiente de expansión volumétrico del aire = 0,003012 K⁻¹

ν_a : Viscosidad cinemática = 1,90E-5 m². s⁻¹

G_r : Número Grashoff = 2,1788E5

$N_{u\theta_c}$: Número Nusselt a un Angulo de inclinación $\theta_c = 4$

K_a : Conductividad térmica del aire a la temperatura T_f = 0,0281 W. m⁻¹. °C⁻¹

h_{cpv} : Coeficiente de convección entre la placa absolvedora y la cubierta = 1,02 W. m⁻². °C⁻¹

U_f : Coeficiente de transferencia de calor por radiación y convección = 5,45 W. m⁻². °C⁻¹

U_t : Coeficiente de transferencia de calor por conducción = 10,45 W. m⁻². °C⁻¹

$U_p = U_{co}$: Coeficiente de transferencia de calor del colector = 15,9 W. m⁻². °C⁻¹

Q_u : Potencia útil del colector por unidad de área = 89,52387097 W. m⁻²

A_C : Área del colector = 2,081693815 m²

η_{co} : Eficiencia del colector = 43,91%

A4.2 Ecuaciones empleadas en los cálculos de los colectores solares

$$m_w = \frac{m_p(M_i - M_f)}{100 - M_f} \quad (1)$$

$$a_w = 1 - \exp[-\exp(0,914 + 0,5639 \ln M_{fs})] = \frac{ERH}{100} \quad (2)$$

$$ERH = a_w * 100 \quad (3)$$

$$m_{dr} = \frac{m_w}{t_d} \quad (3)$$

$$\dot{m} = \frac{m_{dr}}{w_f - w_i} \quad (5)$$

$$E = \dot{m}(h_f - h_i) \quad (6)$$

$$T_{mf} = \frac{T_{eco} + T_{sco}}{2} \quad (7)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_{aire@T_{pelicula}}} \quad (8)$$

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1 - \alpha)\rho]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho} \quad (9)$$

$$F' = \frac{\text{Eficiencia del colector}}{(\tau\alpha)} \quad (10)$$

$$h_{rvc} = \sigma \varepsilon_v \frac{(T_v^4 - T_c^4)}{T_v - T_c} \quad (11)$$

$$R_{eL} = \frac{V_a L_p}{v_a} \quad (12)$$

$$N_u = 0,6 R_{eL}^{0,5} \quad (13)$$

$$h_{cva} = \frac{K_a N_u}{L_p} \quad (14)$$

$$h_{rpv} = \frac{\sigma \left(\frac{\varepsilon_p \varepsilon_v}{\varepsilon_p + \varepsilon_v - \varepsilon_p \varepsilon_v} \right) (T_p^4 - T_v^4)}{(T_p - T_v)} \quad (15)$$

$$\beta_a = \frac{1}{T_f} \quad (16)$$

$$G_r = \frac{g\beta_a(T_p - T_v)S_c^3}{v_a^2} \quad (17)$$

$$N_{u\theta_c} = N_{u0}(\cos\theta_c) + N_{u90}(1 - \cos\theta_c) \quad (18)$$

$$h_{cpv} = \frac{K_a N_{u\theta_c}}{S_c} \quad (19)$$

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{h_{rvc} + h_{cva}} + \frac{1}{h_{rpv} + h_{cpv}}} \quad (20)$$

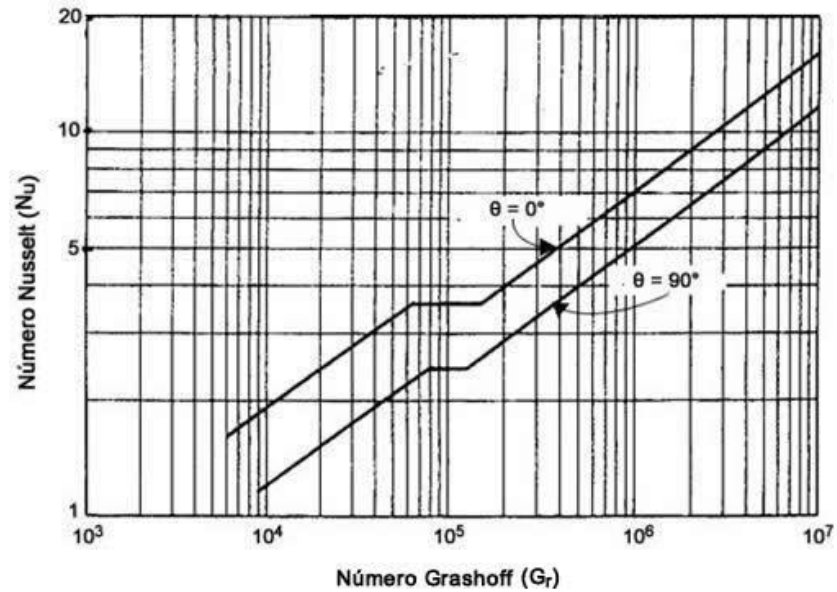
$$U_t = \frac{K_R}{e_R} \quad (21)$$

$$U_p = U_{co} = U_f + U_t \quad (22)$$

$$Q_u = [G_T * F'(\tau\alpha) - F'U_{co}(T_{mf} - T_a)] \quad (23)$$

$$A_C = \frac{E}{Q_u} \quad (24)$$

$$\eta_{co} = \frac{\dot{m}C_p(T_{sco} - T_{eco})}{A_C G_T} \quad (25)$$



Fuente: (Gutiérrez, 2011)

Grafico A4.1. Número de Nusselt (Nu) vs Número de Grashoff (Gr)

ANEXO 5: CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL QUEMADOR DE CASCARILLA DE ARROZ.

A5.1 Valores numéricos de las variables

T_{ent} : Temperatura del aire de entrada = 28°C

T_{sal} : Temperatura del aire de salida = 50°C

Q : Caudal de aire = 26,04102432 m³. hr⁻¹

ρ_{aire} : Densidad del aire a la temperatura de película (40°C) = 1,127 kg. m⁻³

C_p : Calor específico del aire a la temperatura de la película (40°C) = 1007 J. kg⁻¹. °C⁻¹

\dot{m}_{aire} : Flujo másico de aire en el intercambiador de calor = 0,008152287 kg. s⁻¹

Q_{aire} : Calor suministrado al aire en el intercambiador de calor = 0,180605774 KW

$Q_{perdida}$: Calor de perdidas = 0,173523194 KW

$Q_{combustión}$: Calor de combustión = 0,354128968 KW

$PCS_{cascarilla}$: Poder calorífico superior de la cascarilla de arroz = 15275 KJ. Kg⁻¹

$\dot{m}_{combustible} = \dot{m}_c$: Flujo de cascarilla de arroz = 2,31836E-05 kg

ma/c : Relación estequiométrica aire combustible = 13,185

ϕ_{real} : Relación aire – combustible real = 2

Q_a : Flujo de aire para garantizar una óptima combustión = 0,000542458 m³. s⁻¹

T_g : Temperatura de salida de los gases de combustión = 593°C

T_a : Temperatura ambiente = 28°C

Q_g : Flujo volumétrico de los gases = 0,001560694 m³. s

V_g : Velocidad de los gases de combustión = 0,7 m. s⁻¹

A : Área transversal de la chimenea = 0,002229563 m²

ρ_{ceniza} : Densidad de la ceniza de cascarilla de arroz = 2160 kg. m⁻³

V_g : Volumen necesario para los gases = 108,3634642 cm³

V_{ceniza} : Volumen de las cenizas = 772,7855274 cm³

V_{cc} : Volumen de la cámara de combustión = 881,1489916 cm³

η_{qu1} : Eficiencia del quemador modo quemado de biomasa = 28,18%

η_{qu2} : Eficiencia del quemador modo hibrido = 36,72%

A5.2. Ecuaciones empleadas en los cálculos del quemador de cascarilla de arroz

$$\dot{m}_{aire} = Q * \rho \quad (49)$$

$$Q_{aire} = \dot{m}_{aire} * C_p * (T_{sal} - T_{ent}) \quad (50)$$

$$Q_{combustión} = Q_{aire} + Q_{perdida} \quad (51)$$

La eficiencia térmica del quemador es aproximadamente 51%, es decir, el 49% del calor generado en la combustión se pierde por combustión mecánica incompleta, por radiación y convección entre las paredes de la cámara de combustión y pérdidas de calor sensible de las cenizas (Valverde, Agustín 2007).

$$Q_{perdida} = 0,49 * Q_{combustión} \quad (52)$$

$$Q_{combustión} = \frac{Q_{aire}}{0,51} \quad (53)$$

$$\dot{m}_{combustible} = \dot{m}_c = \frac{Q_{combustible}}{PCS_{cascarilla}} \quad (54)$$

$$Q_a = \frac{\phi_{real} * \dot{m}_c * m_{a/c}}{\rho_{aire}} \quad (55)$$

$$Q_g = \frac{273+T_g}{273+T_a} * Q_a \quad (56)$$

$$A = \frac{Q_g}{V_g} \quad (57)$$

$$V_g = 600 \left[\frac{cm^3}{KW} \right] * Q_{aire} \quad (58)$$

$$V_{ceniza} = \frac{\dot{m}_c * t}{\rho_{ceniza}} \quad (59)$$

$$V_{CC} = V_g + V_{ceniza} \quad (60)$$

$$\eta_{qu} = \frac{\dot{m}_{aire} C_p \Delta T_{aire}}{\dot{m}_{cascarilla} PCS_{cascarilla}} \quad (61)$$

ANEXO 6: CÁLCULOS REALIZADOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE FLUJO CRUZADO.

A6.1 Valores numéricos de las variables

T_{ig} : Temperatura de los gases posterior a la combustión = 593°C

ρ : Densidad da los gases a la temperatura posterior de la combustión (T_{ig}) = 0,4078 kg. m⁻³

C_p : Calor especifico de los gases a la temperatura posterior de la combustión (T_{ig}) = 1,11346 J. kg⁻¹. °C⁻¹

$\dot{m}_{gases\ de\ chimenea}$: Flujo de gases por la chimenea = 0,000636451 kg. s⁻¹

T_{fg} : Temperatura de salida de los gases de combustión a la atmosfera = 338,145713 °C

μ : Viscosidad dinámica del aire a la temperatura de la película (40°C) = 1,918E-5 kg. m⁻¹. s⁻¹

K : Conductividad térmica del aire a la temperatura de película (40°C) = $0,02662 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

P_r : Numero de Prandtl del aire a la temperatura de película (40°C) = $0,7255$

D : Diámetro para el tubo del intercambiador = $0,018583297 \text{ m}$

R_e : Reynold = $2183,87656$

N_U : Nusselt = $6,819727888$

h_i : Coeficiente de convección interno = $9,76904971 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

R_{in} : Resistencia al interior = $1,753371787 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$

h_e : Coeficiente de convección externo = $17,43031953 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

R_{ex} : Resistencia al exterior = $0,982700066 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$

R_f : Factor de incrustación para el aire = $0,0004 \text{ m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$

R_{ii} : Factor de incrustación interno = $0,00685151 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$

R_{ie} : Factor de incrustación externo = $0,00685151 ^{\circ}\text{C} \cdot \text{W}^{-1}$

U_e : Coeficiente de transferencia de calor global = $6,229155817 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$

T_{ia} : Temperatura de entrada del aire en el intercambiador calor = 28°C

T_{fa} : Temperatura de salida del aire en el intercambiador de calor = 50°C

$\Delta T_1 = 543 ^{\circ}\text{C}$

$\Delta T_2 = 310,145713 ^{\circ}\text{C}$

ΔT_m : Diferencia de temperatura media logarítmica = $415,7614164 ^{\circ}\text{C}$

F : Factor de corrección = 1

A_s : Área de transferencia de calor = $0,069736196 \text{ m}^2$

L : Longitud del tubo para el intercambiador = $1,194495686 \text{ m}$

A6.2 Ecuaciones empleadas en los cálculos del intercambiador de flujo cruzado

$$\dot{m}_{gases\ de\ chimenea} \quad (1)$$

$$T_{fg} = T_{ig} - \frac{Q_{aire}}{m_{gases\ chimenea} C_p} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_a}{\pi \cdot V}} \quad (3)$$

$$R_e = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (4)$$

$$N_U = 0,021(R_e^{0,8} - 100)P_r^{0,4} \quad (5)$$

$$h_i = N_U \frac{K}{D} \quad (6)$$

$$R_{in} = \frac{1}{A h_i} \quad (7)$$

$$h_e = 1,32 \left(\frac{T_{ig} - T_A}{D} \right)^{1/4} \quad (8)$$

$$R_{ex} = \frac{1}{A h_e} \quad (9)$$

$$R_{ii} = \frac{R_f}{A} \quad (10)$$

$$R_{ie} = \frac{R_f}{A} \quad (11)$$

$$U_e = \frac{1}{A(R_{in} + R_{ex} + R_{ii} + R_{ie})} \quad (12)$$

$$\Delta T_1 = T_{ig} - T_{fa} \quad (13)$$

$$\Delta T_2 = T_{fg} - T_{ia} \quad (14)$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (15)$$

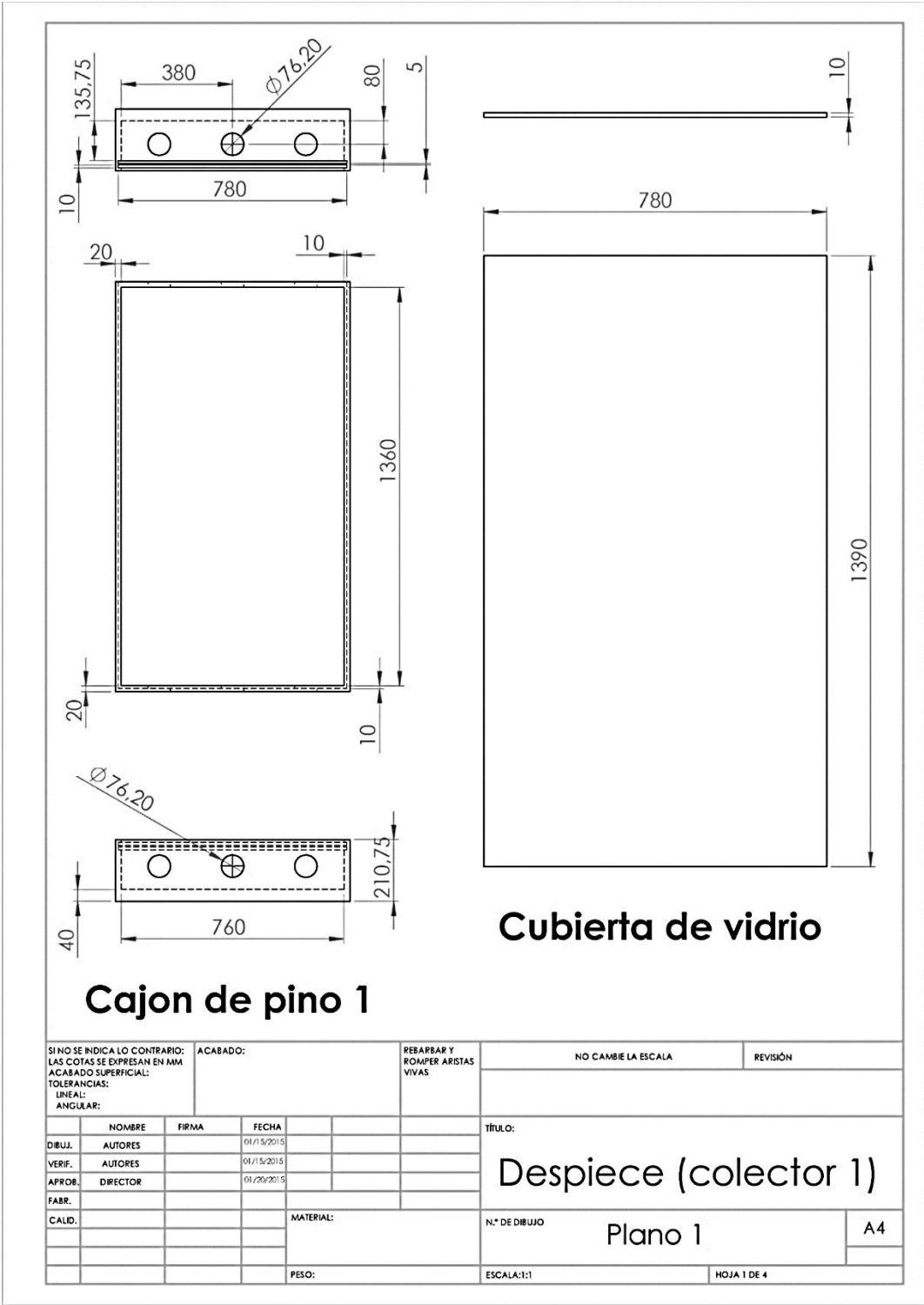
$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (16)$$

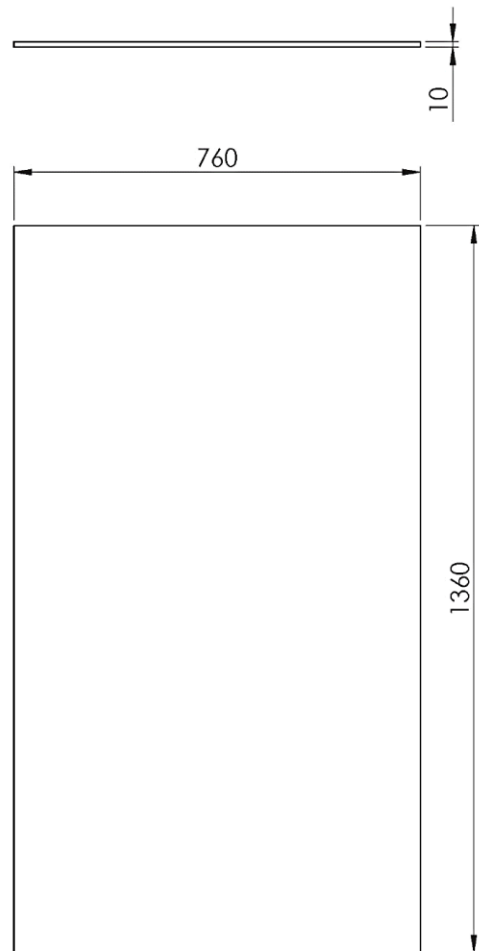
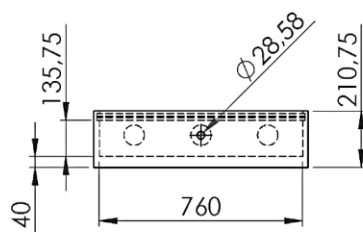
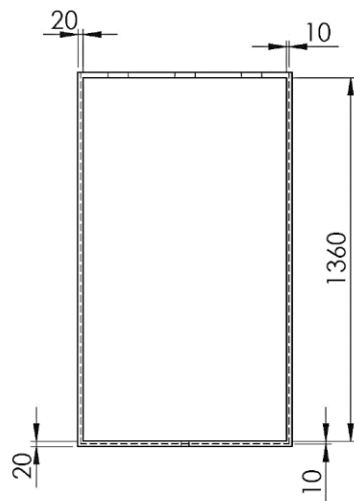
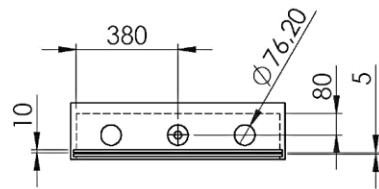
$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (17)$$

$$A_s = \frac{Q}{U F \Delta T_m} \quad (18)$$

$$L = \frac{A_s}{\pi D} \quad (19)$$

ANEXO 7: PLANOS DEL SISTEMA HIBRIDO

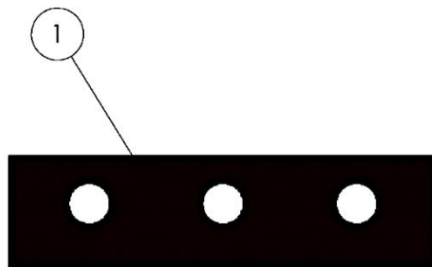
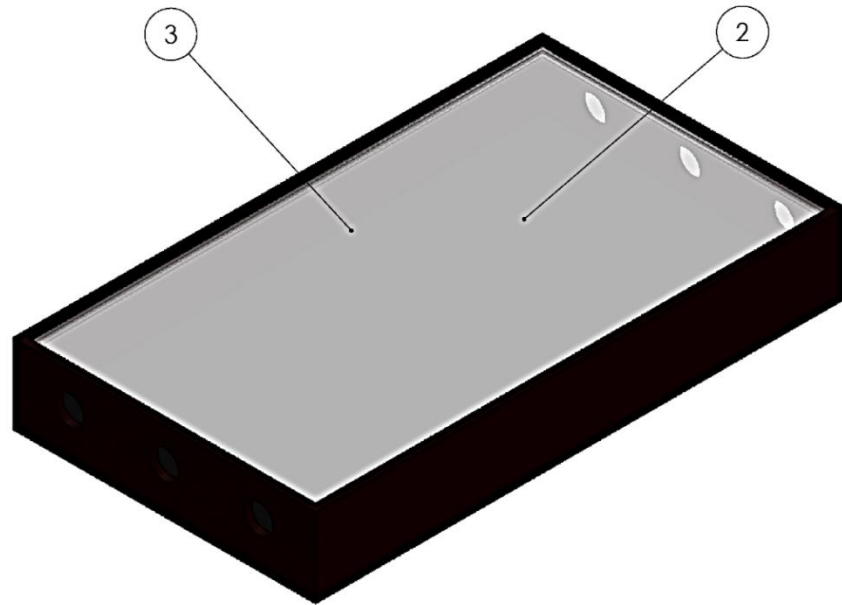




Cajon de pino 2

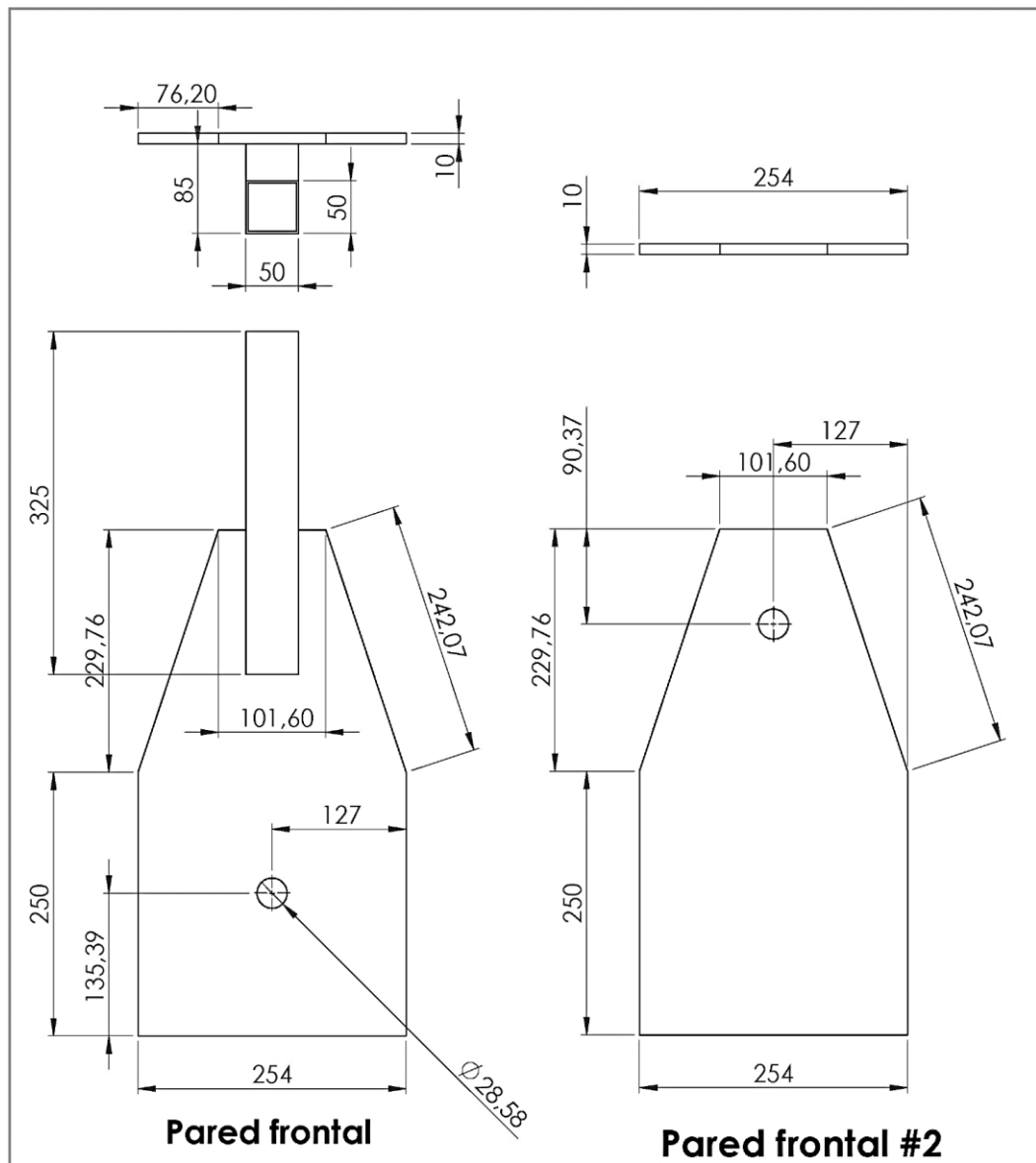
Placa absolvedora

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	

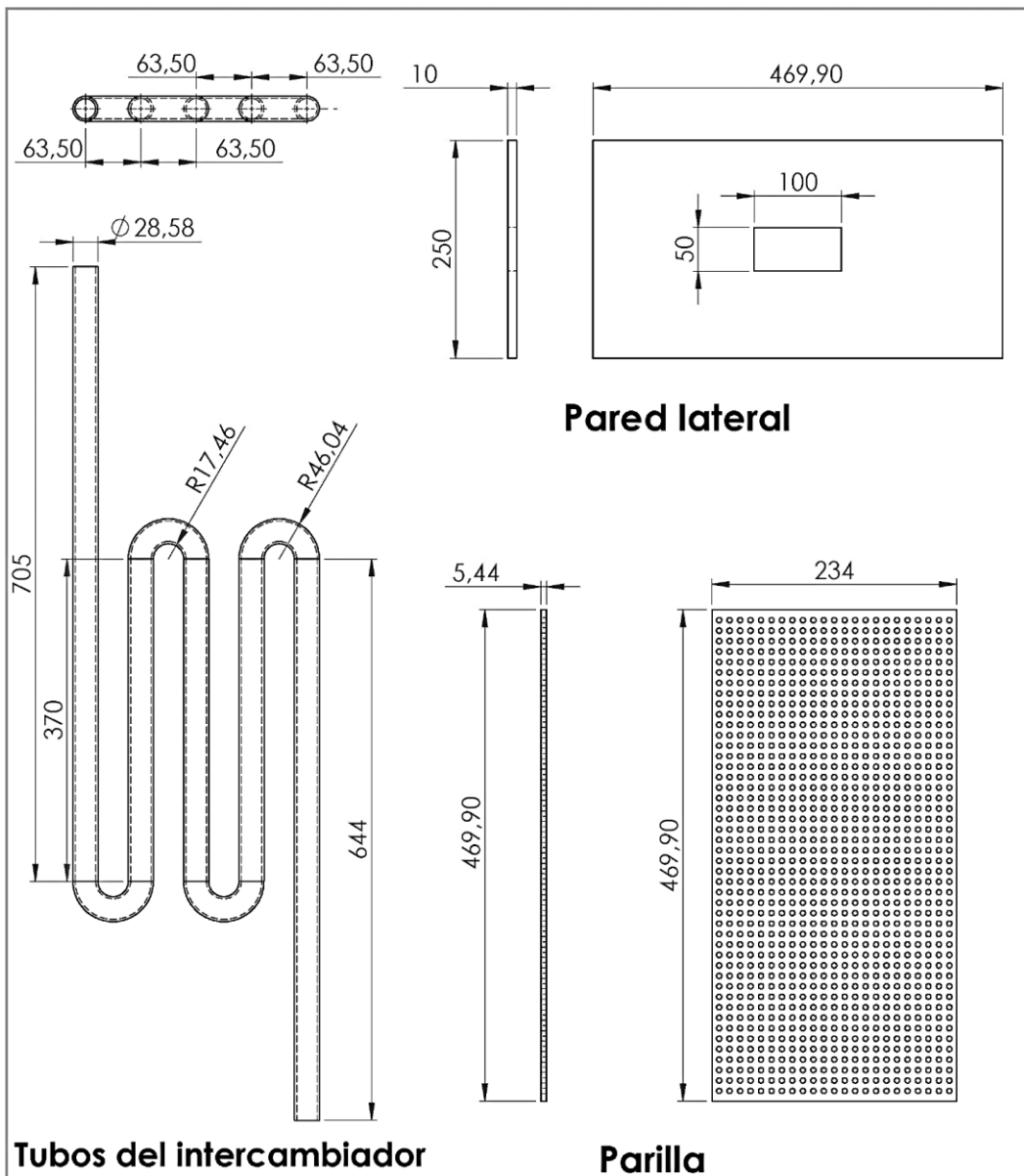


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Cajon de roble 1	1
2	Placa absolvedora 1	1
3	Cubierta de vidrio 1	2

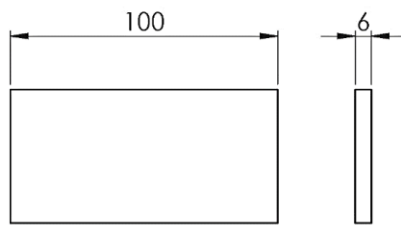
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
								TÍTULO: Colector solar			
DIBUJ. AUTORES				FECHA				N.º DE DIBUJO Plano 4			
VERIF. AUTORES				01/15/2015				A4			
APROB. DIRECTOR				01/20/2015							
FABR.											
CALD.						MATERIAL:					
						PESO:		ESCALA:1:1			
								HOJA 4 DE 4			



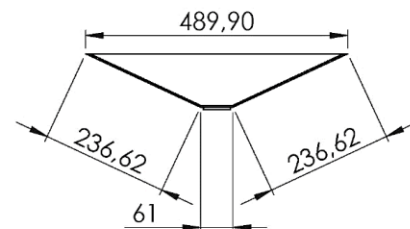
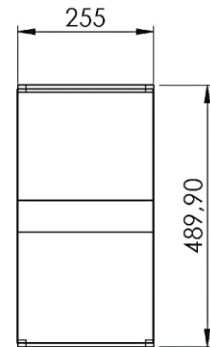
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	



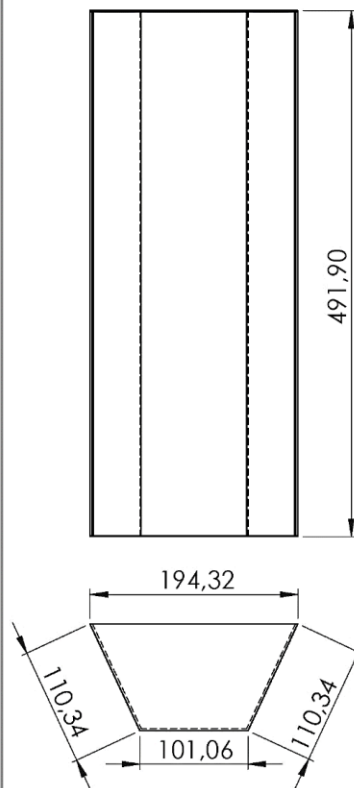
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN		
	NOMBRE	FIRMA	FECHA				TÍTULO:					
DIBUJ.	AUTORES		01/15/2015				Despiece 2 (quemador)					
VERIF.	AUTORES		01/15/2015									
APROB.	DIRECTOR		01/20/2015									
FABR.												
CALID.												
				MATERIAL:			N.º DE DIBUJO Plano 2					A4
				PESO:			ESCALA:1:1					HOJA 2 DE 5



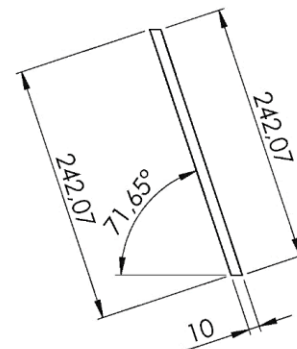
Vidrio



Fondo

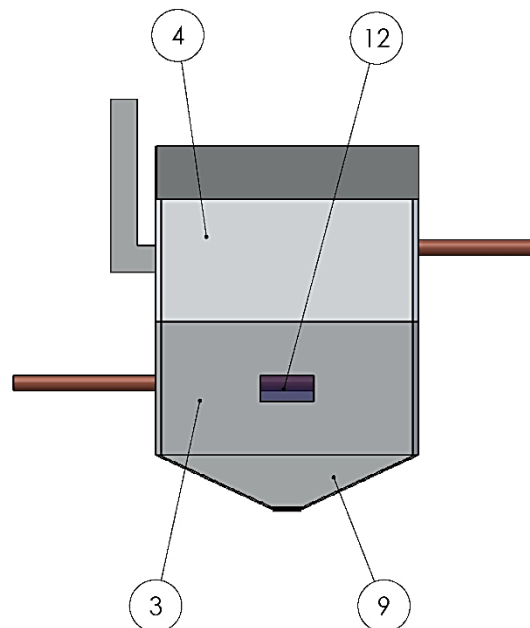


Tolva



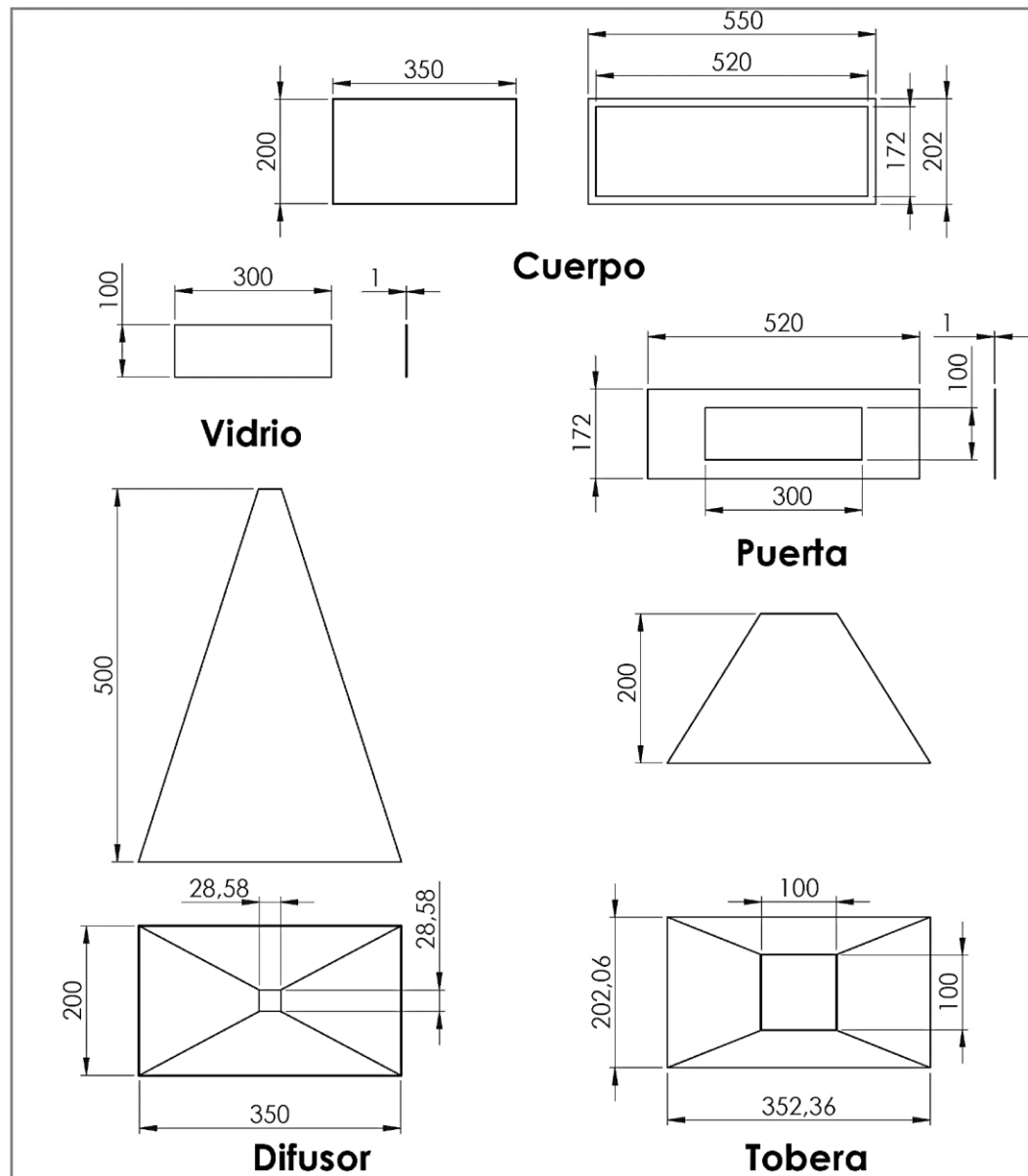
Pared lateral inclinada

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DIBUJ.</td> <td>AUTORES</td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td>AUTORES</td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td>DIRECTOR</td> <td></td> <td>01/30/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CALID.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>									NOMBRE	FIRMA	FECHA					DIBUJ.	AUTORES		01/15/2015					VERIF.	AUTORES		01/15/2015					APROB.	DIRECTOR		01/30/2015					FABR.								CALID.								TÍTULO:			
	NOMBRE	FIRMA	FECHA																																																								
DIBUJ.	AUTORES		01/15/2015																																																								
VERIF.	AUTORES		01/15/2015																																																								
APROB.	DIRECTOR		01/30/2015																																																								
FABR.																																																											
CALID.																																																											
								Despiece 3 (quemador)																																																			
								N.º DE DIBUJO																																																			
								Plano 3																																																			
								A4																																																			
PESO:								ESCALA:1:1																																																			
								HOJA 3 DE 5																																																			

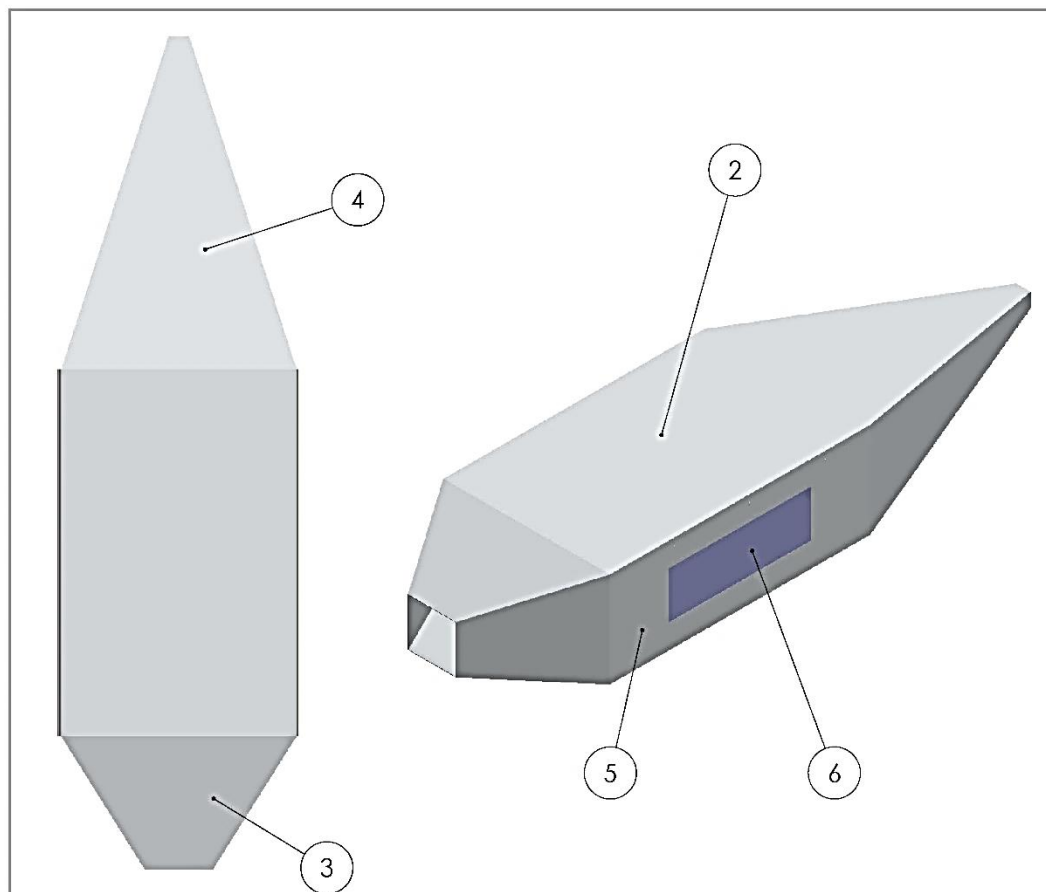


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
7	Pared lateral #2	1
8	Pared lateral inclinada #2	1
9	soporte quemador	1
10	Tolva	1
12	vidrio del quemador	1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO: ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
						<p>TÍTULO:</p> <h1>Quemador de cascarilla de arroz</h1>			
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA						
VERIF.	AUTORES		01/15/2015						
APROB.	AUTORES		01/15/2015						
FABR.	DIRECTOR		01/20/2015						
CALID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
						Plano 5			
				PESO:		ESCALA:1:1		HOJA 5 DE 5	

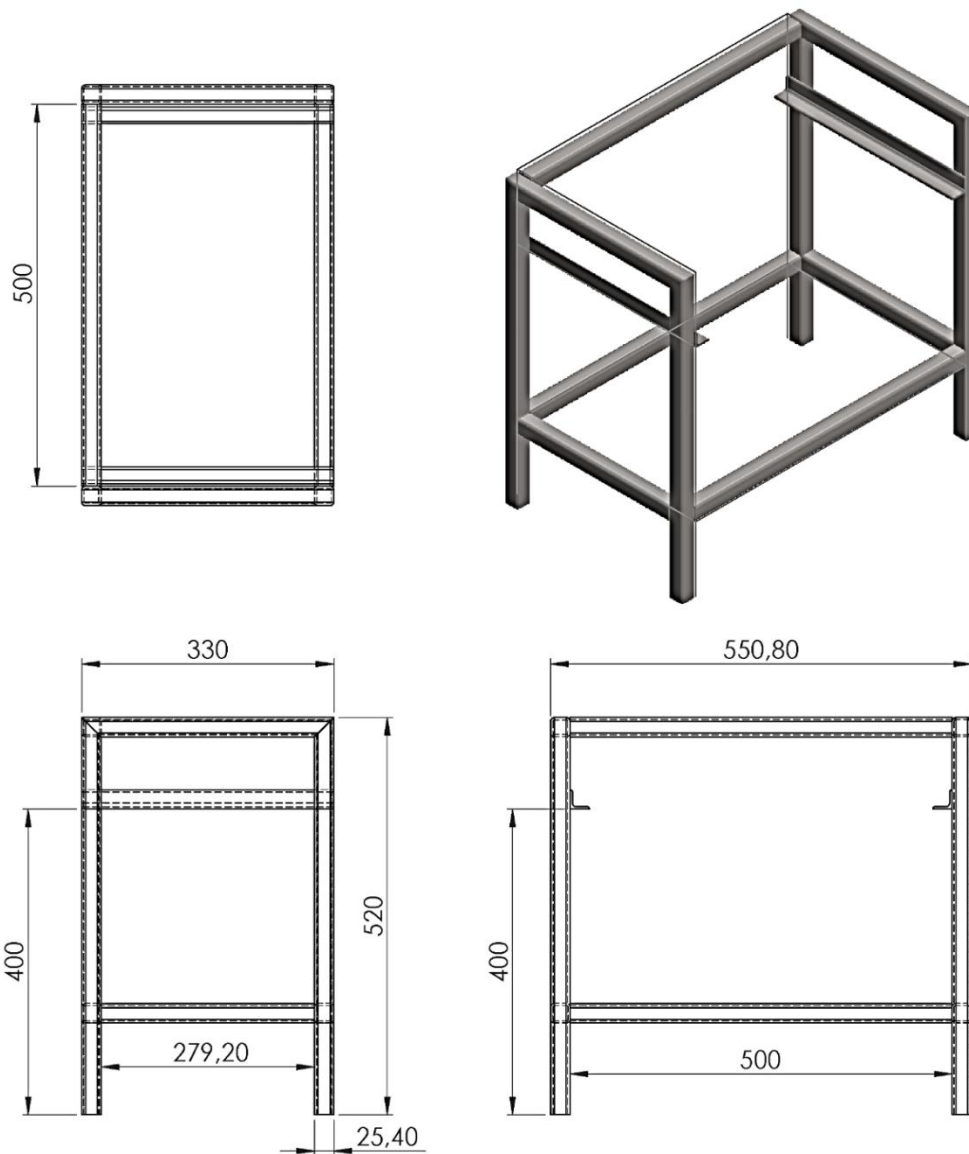


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA			TÍTULO:					
DIBUJ.	AUTORES		01/15/2015			Despiece (secador)					
VERIF.	AUTORES		01/15/2015								
APROB.	DIRECTOR		01/20/2015								
FABR.											
CALID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO					A4
						Plano 1					
				PESO:		ESCALA:1:1					HOJA 1 DE 3

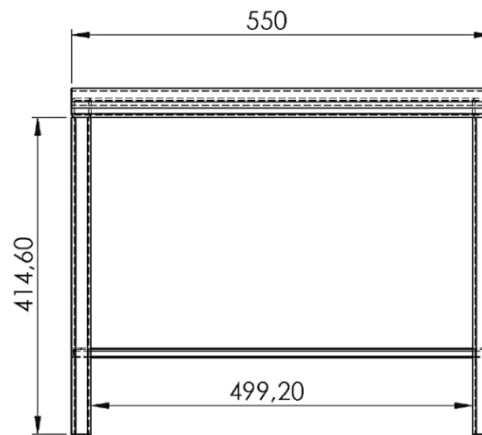
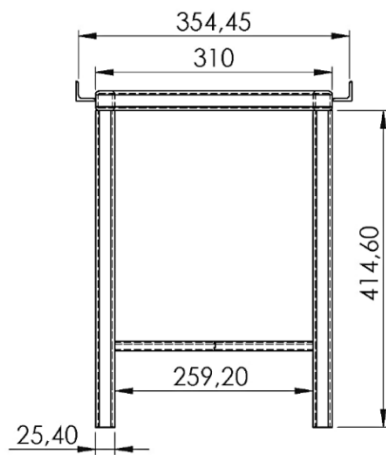
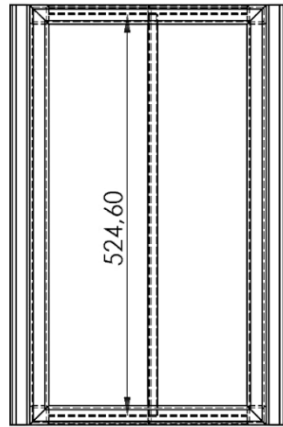


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
2	Cuerpo del secador	1
3	Tobera de salida	1
4	Difusor de entrada	1
5	Tapa del secador	1
6	Vidrio del secador	1

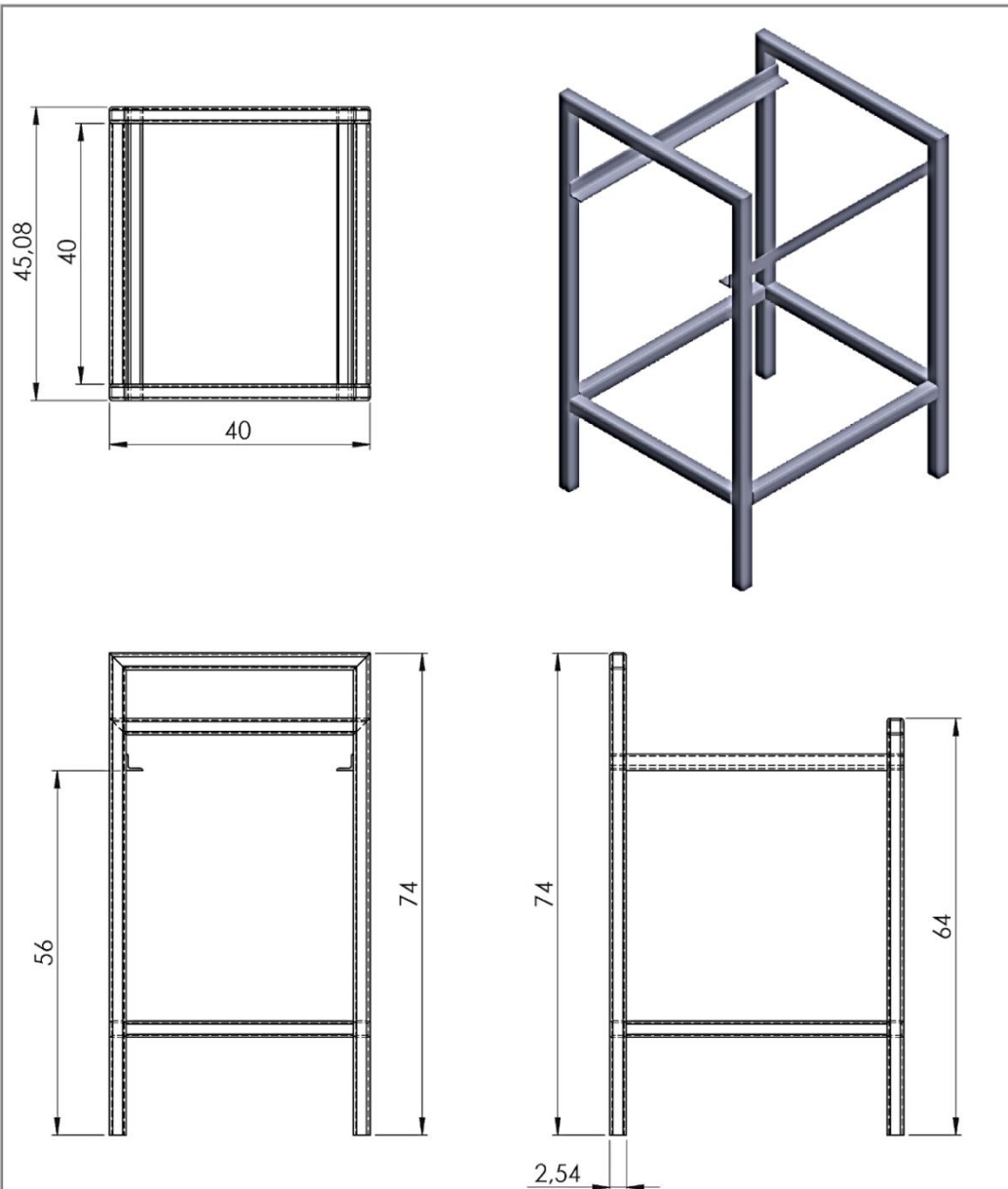
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN																				
								TÍTULO: Secador de productos agrícolas																						
<table border="1"> <tr> <td>NOMBRE</td> <td>FIRMA</td> <td>FECHA</td> </tr> <tr> <td>AUTORES</td> <td></td> <td>01/15/2015</td> </tr> <tr> <td>AUTORES</td> <td></td> <td>01/15/2015</td> </tr> <tr> <td>DIRECTOR</td> <td></td> <td>01/20/2015</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				NOMBRE	FIRMA	FECHA	AUTORES		01/15/2015	AUTORES		01/15/2015	DIRECTOR		01/20/2015										MATERIAL:		N.º DE DIBUJO			
NOMBRE	FIRMA	FECHA																												
AUTORES		01/15/2015																												
AUTORES		01/15/2015																												
DIRECTOR		01/20/2015																												
						Plano 3																								
				PESO:		ESCALA:1:1																								
						HOJA 3 DE 3																								
						A4																								



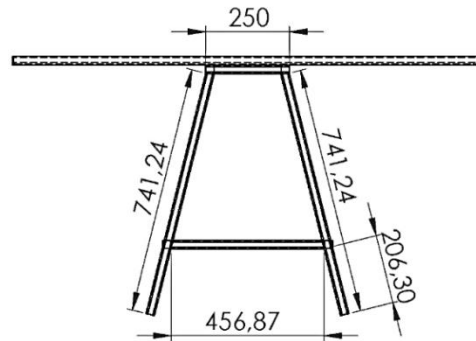
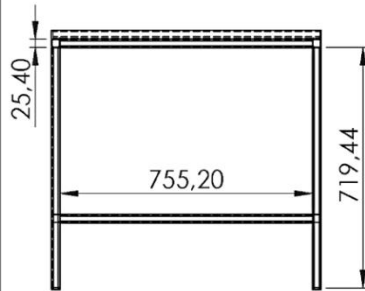
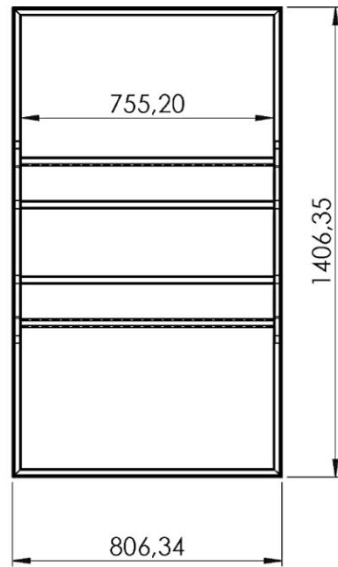
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN																																																	
<table border="1"> <tr> <td>DIBUJ.</td> <td>NOMBRE</td> <td>FIRMA</td> <td>FECHA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AUTORES</td> <td></td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td>AUTORES</td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td>DIRECTOR</td> <td></td> <td>01/20/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CALD.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>								DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA					AUTORES			01/15/2015					VERIF.	AUTORES		01/15/2015					APROB.	DIRECTOR		01/20/2015					FABR.								CALD.								TÍTULO:			
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA																																																								
AUTORES			01/15/2015																																																								
VERIF.	AUTORES		01/15/2015																																																								
APROB.	DIRECTOR		01/20/2015																																																								
FABR.																																																											
CALD.																																																											
								Soporte para el quemador																																																			
								N.º DE DIBUJO		A4																																																	
								Plano 4																																																			
								MATERIAL:																																																			
								PESO:																																																			
								ESCALA: 1:1		HOJA 4 DE 5																																																	



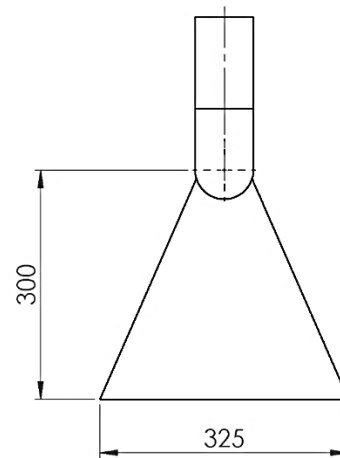
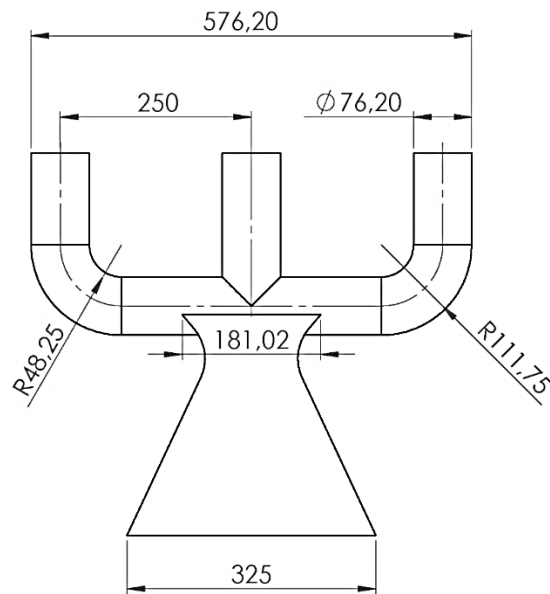
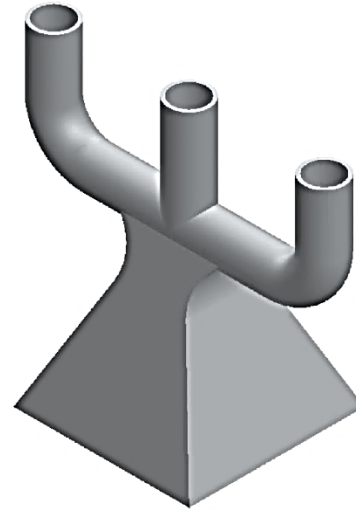
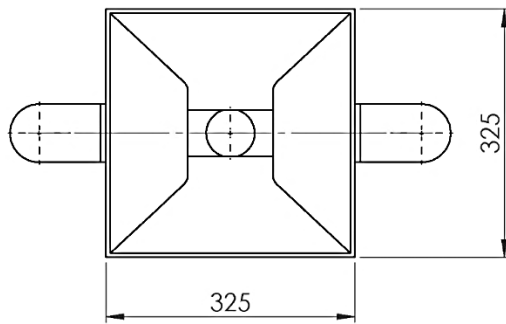
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN																																																	
<table border="1"> <tr> <td>DIBUJ.</td> <td>NOMBRE</td> <td>FIRMA</td> <td>FECHA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AUTORES</td> <td></td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td>AUTORES</td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td>DIRECTOR</td> <td></td> <td>01/20/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CALD.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>								DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA					AUTORES			01/15/2015					VERIF.	AUTORES		01/15/2015					APROB.	DIRECTOR		01/20/2015					FABR.								CALD.								TÍTULO:			
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA																																																								
AUTORES			01/15/2015																																																								
VERIF.	AUTORES		01/15/2015																																																								
APROB.	DIRECTOR		01/20/2015																																																								
FABR.																																																											
CALD.																																																											
								Soporte para el secador																																																			
								N.º DE DIBUJO		A4																																																	
								Plano 2																																																			
								MATERIAL:																																																			
								PESO:																																																			
								ESCALA: 1:1		HOJA 2 DE 3																																																	



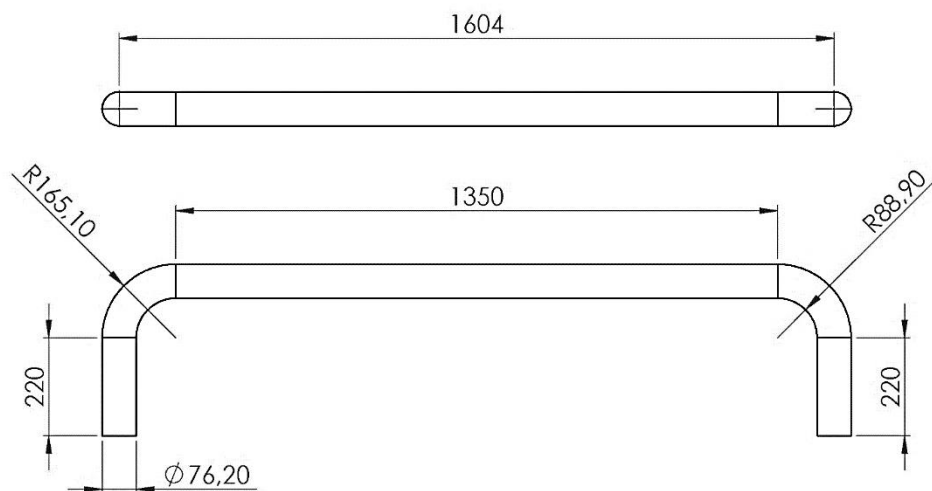
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
								TÍTULO:			
								Soporte para el ventilador			
DIBUJ. AUTORES				FECHA				N.º DE DIBUJO			
VERIF. AUTORES				01/15/2015				Plano 1			
APROB. DIRECTOR				01/20/2015				A4			
FABR.											
CALID.						MATERIAL:					
						PESO:		ESCALA:1:1			
								HOJA 1 DE 1			



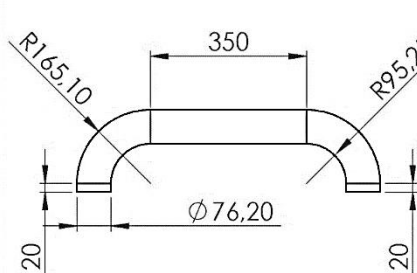
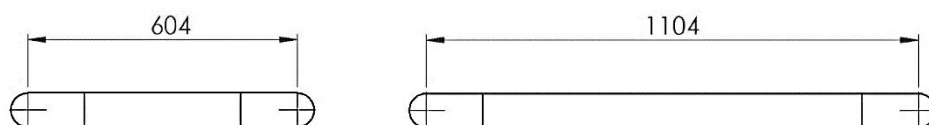
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
DIBUJ.				NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:	
AUTORES								01/15/2015		Soporte para los colectores	
VERIF.								01/15/2015			
APROB.				DIRECTOR				01/20/2015			
FABR.											
CALD.										MATERIAL:	
										Acero	
										N.º DE DIBUJO	
										Plano 3	
										A4	
										ESCALA: 1:1	
										HOJA 3 DE 4	



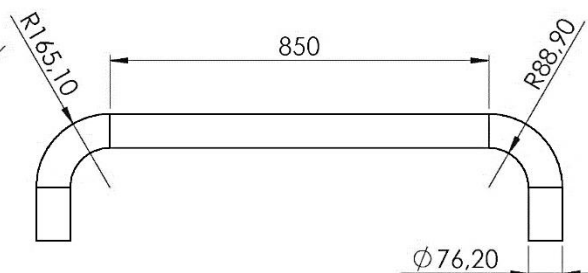
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN																																																	
<table border="1"> <tr> <td>DIBUJ.</td> <td>NOMBRE</td> <td>FIRMA</td> <td>FECHA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>AUTORES</td> <td></td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF.</td> <td>AUTORES</td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB.</td> <td>DIRECTOR</td> <td></td> <td>01/20/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CALID.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>								DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA					AUTORES			01/15/2015					VERIF.	AUTORES		01/15/2015					APROB.	DIRECTOR		01/20/2015					FABR.								CALID.								TÍTULO:			
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA																																																								
AUTORES			01/15/2015																																																								
VERIF.	AUTORES		01/15/2015																																																								
APROB.	DIRECTOR		01/20/2015																																																								
FABR.																																																											
CALID.																																																											
								TUBERIA C-V																																																			
								N.º DE DIBUJO		A4																																																	
								MATERIAL:		PLANO 1																																																	
								PESO:		ESCALA: 1:1																																																	
										HOJA 1 DE 1																																																	



Tuberia de union 3



Tuberia de union 1



Tuberia de union 2

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN																																					
<table border="1"> <tr> <td>NOMBRE</td> <td>FIRMA</td> <td>FECHA</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>DIBUJ. AUTORES</td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>VERIF. AUTORES</td> <td></td> <td>01/15/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>APROB. DIRECTOR</td> <td></td> <td>01/20/2015</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>FABR.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>CALID.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>						NOMBRE	FIRMA	FECHA				DIBUJ. AUTORES		01/15/2015				VERIF. AUTORES		01/15/2015				APROB. DIRECTOR		01/20/2015				FABR.						CALID.						TÍTULO: Tuberia de union para colectores			
NOMBRE	FIRMA	FECHA																																											
DIBUJ. AUTORES		01/15/2015																																											
VERIF. AUTORES		01/15/2015																																											
APROB. DIRECTOR		01/20/2015																																											
FABR.																																													
CALID.																																													
MATERIAL: PVC						N.º DE DIBUJO Plano 1		A4																																					
PESO:						ESCALA: 1:1		HOJA: 1 DE 1																																					

ANEXO 8: COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO DE CALENTAMIENTO DE AIRE Y DIFERENTES FORMAS DE FUNCIONAMIENTO.



Fuente propia, 2015.

Figura A8.1. Ventilador centrífugo.



Fuente propia, 2015.

Figura A8.2. Colectores solares de placa plana con material de cambio de fase PCM (parafina).



Fuente propia, 2015.

Figura A8.3. Quemador de combustible sólido.



Fuente propia, 2015.

Figura A8.4. Secador de productos agrícola.



Fuente propia, 2015.

Figura A8.5. Sistema híbrido de calentamiento de aire en modo solar.



Fuente propia, 2015.

Figura A8.6. Sistema híbrido de calentamiento de aire en modo híbrido.



Fuente propia, 2015.

Figura A8.7. Sistema híbrido de calentamiento de aire en modo combustión de biomasa.

ANEXO 9. PORCENTAJE DE HUMEDAD INICIAL Y CURVA DE TIEMPO DE SECADO POR MEDIO DE UNA ESTUFA DE FLUJO ESTÁTICO EN EL LABORATORIO.

Tabla A9.1. Porcentaje de humedad inicial de la Yuca variedad Venezolana

Hora	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
09:45 a.m.	3,01	3,04	3,07	3,04	3,03	3,03	3,00	3,02	3,01	3,05
05:45 p.m.	1,14	1,21	1,16	1,12	1,11	1,18	1,13	1,19	1,16	1,15
%Hi	62,13	60,20	62,21	63,16	63,37	61,06	62,33	60,60	61,46	62,30
%Hi (promedio)	61,88									

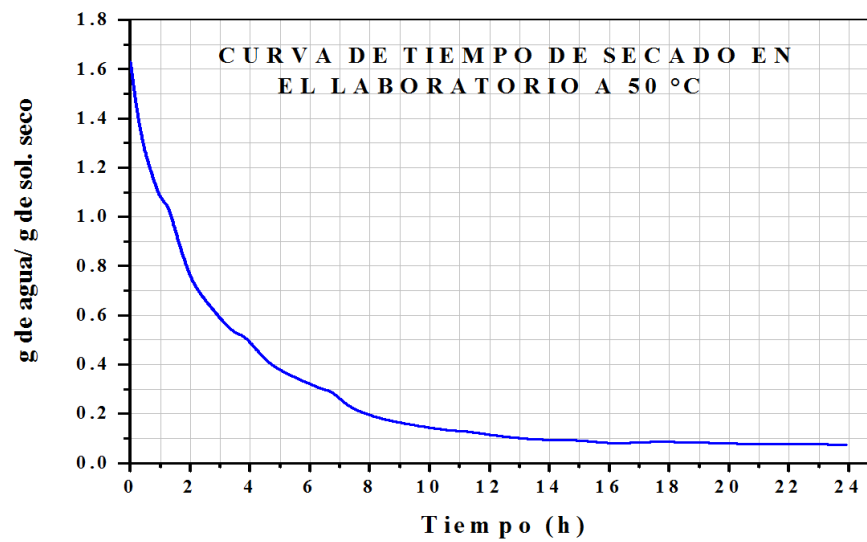
Tabla A9.2. Masa final en (g) y tiempo de secado (min) de las muestras de Yuca variedad Venezolana a 50°C

%hi= 62%	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
%hf= 12%										
Mi (g)	42,18	33,15	24,75	32,32	36,14	33,78	47,70	34,38	35,01	26,21
Mf (g)	18,21	14,31	10,69	13,96	15,61	14,59	20,60	14,85	15,12	11,32
Tsecado(min)	360	465	1445	1445	1445	1445	650	1445	785	965
Tprom (min)	1045									

*Los tiempos de secado de las muestras (M1, M2 y M7) se consideraron puntos estadísticamente no validos para el análisis de los resultados. Luego, se consideró $T_{prom}=1282.14$ min.

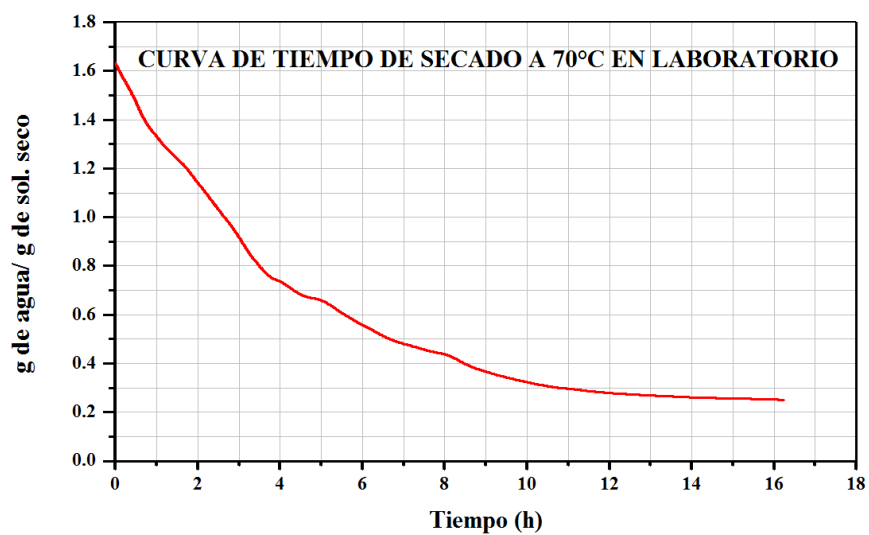
Tabla A9.3. Masa final en (g) y tiempo de secado (min) de las muestras de Yuca Venezolana a 70°C

%hi= 62%	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
%hf= 12%										
Mi (g)	23,42	22,00	17,90	24,01	31,50	27,20	33,60	27,55	35,87	29,28
Mf (g)	10,11	9,50	7,73	10,37	13,60	11,75	14,51	11,90	15,49	12,64
Tsecado(min)	985	955	975	970	960	990	1005	975	940	960
Tprom (min)	971,5									



Fuente propia, 2015.

Figura A9.1. Curva de tiempo de secado a 50°C con estufa de flujo estático.



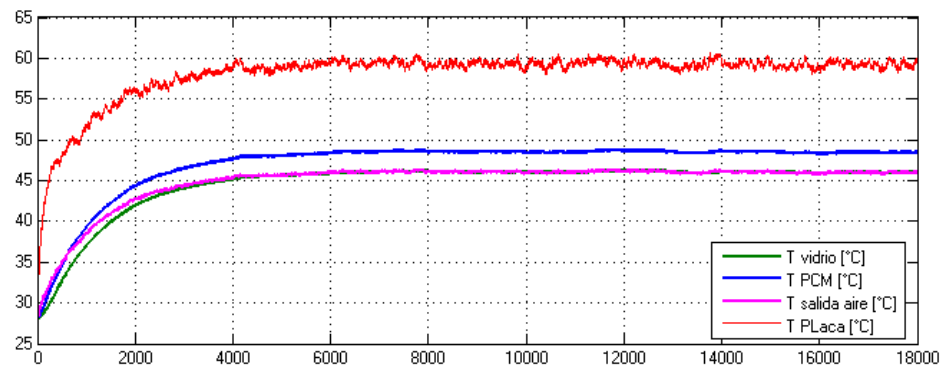
Fuente propia, 2015.

Figura A9.2. Curva de tiempo de secado a 70°C con estufa de flujo estático.

ANEXO 10: SIMULACIÓN TÉRMICA EN LOS COLECTORES SOLARES.

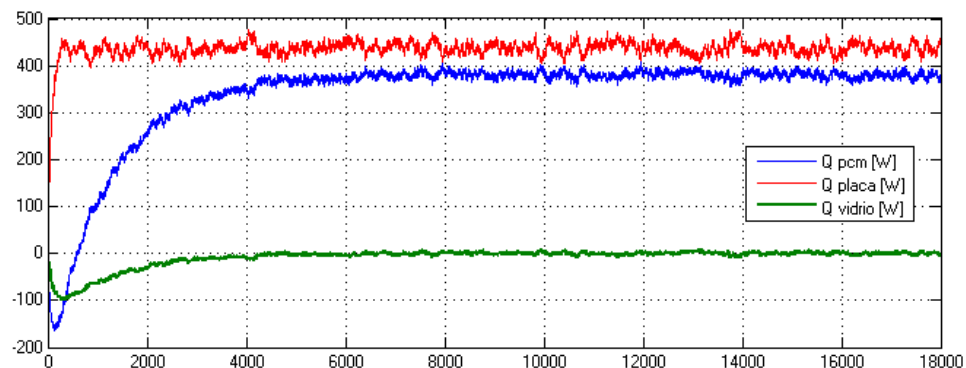
Tabla 10.1. Resultados de simulación térmica para 50 tubos en cada colector.

Componentes	Reinold (Re)	Nusselt (Nu)	h ($\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$)	Q (W)
Placa absorbadora-Aire	8.93×10^5 $> 5 \times 10^5$	1916.13	38.03	452.4
Vidrio-Aire	9.03×10^5 $> 5 \times 10^5$	1933.62	38,16	-3.87
PCM-Aire	79879.87	280.56	114.9	367.2



Fuente propia, 2015.

Figura A10.1. Variación de las temperaturas (eje Y, en °C) de los componentes del colector solar respecto al tiempo (eje X, en segundos).



Fuente propia, 2015.

Figura A10.2. Variación de los Calores (eje Y, en W) transferidos al aire respecto al tiempo (eje X, en segundos).

ANEXO 11: CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA RETIRADA EN LOS 5 KG DE YUCA.

$$m_{Total} = 5 \text{ kg}$$

$$m_{agua} = m_{Total} * h_i = 5 \text{ kg} * 0,62 = 3,1 \text{ kg}$$

$$m_{solido} = m_{Total} - m_{agua} = 5 \text{ kg} - 3,1 \text{ kg} = 1,9 \text{ kg}$$

$$m_{agua \text{ a retirar}} = m_{agua} X = 3,1X$$

Donde X es el porcentaje de agua a retirar en la Yuca.

$$m_{agua \text{ que queda}} = m_{agua} - m_{agua \text{ a retirar}} = 3,1(1 - X)$$

$$m_{Total \text{ nueva}} = m_{solido} + m_{agua \text{ que queda}} = 1,9 + 3,1(1 - X)$$

Luego, se tiene que el porcentaje de agua a retirar (X) está relacionado con la humedad final ($\%h_f=0,12$) de la nueva masa por medio de la siguiente expresión:

$$\%h_f = \frac{m_{agua \text{ que queda}}}{m_{Total \text{ nueva}}} = \frac{3,1(1 - X)}{1,9 + 3,1(1 - X)} = 0,12$$

Resolviendo se tuvo que:

$$X = 1 - \frac{1,9}{\left[\frac{1}{0,12} - 1\right] * 3,1} = 0,9164 = 91,64\%$$

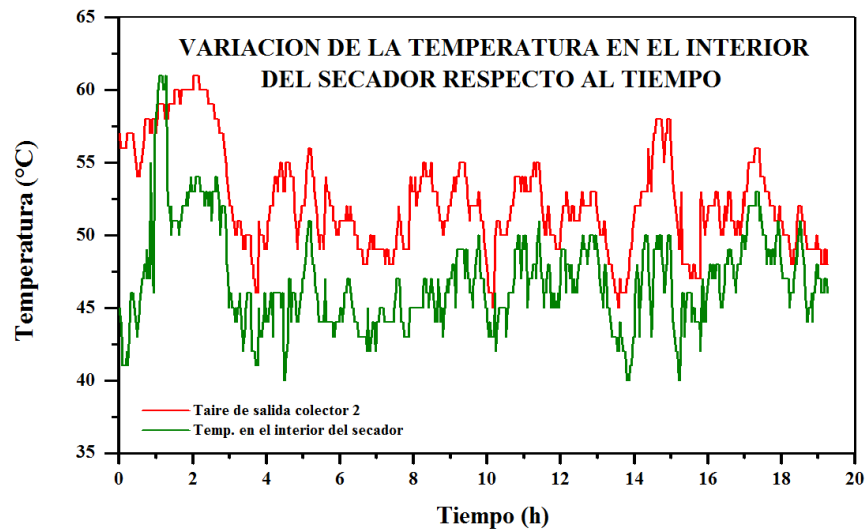
De esta forma, se determinó la cantidad de agua retirada de la Yuca:

$$m_{agua \text{ a retirar}} = 3,1X = 3,1 \text{ kg} * 0,9164 = 2,84 \text{ kg}$$

Así, la velocidad de secado está dada por:

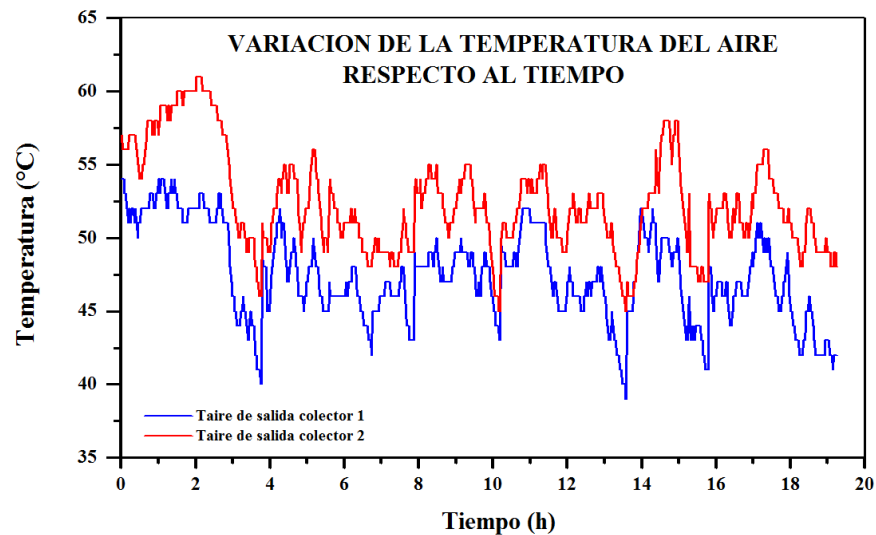
$$V_{secado} = \frac{m_{agua \text{ a retirar}}}{T_{secado}} = \frac{2,84 \text{ kg}}{19,25 \text{ h}} = 0,148 \frac{\text{kg de agua}}{\text{h}}$$

ANEXO 12: OPERACIÓN DEL EQUIPO EN MODO SOLAR.



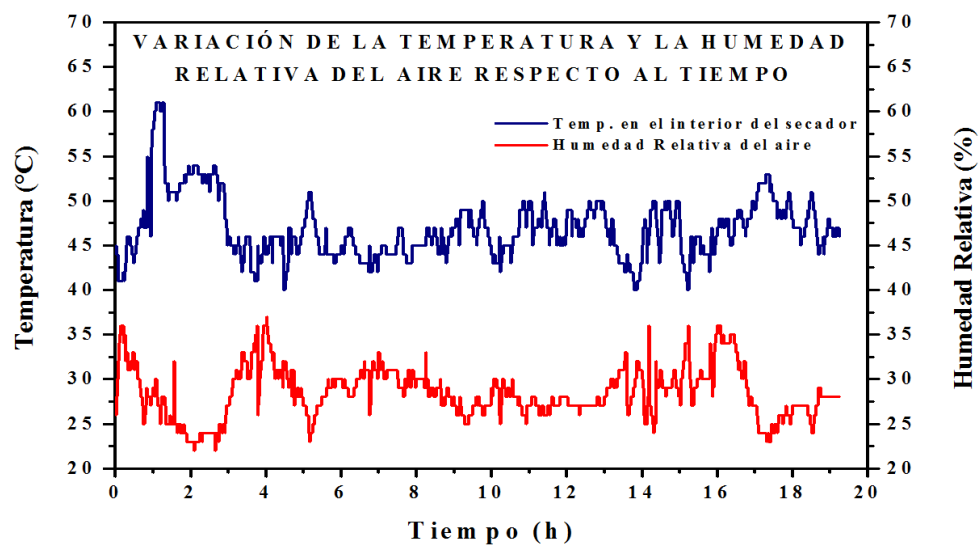
Fuente propia, 2015.

Figura A12.1. Variación de la temperatura en el interior del secador respecto al tiempo de secado.



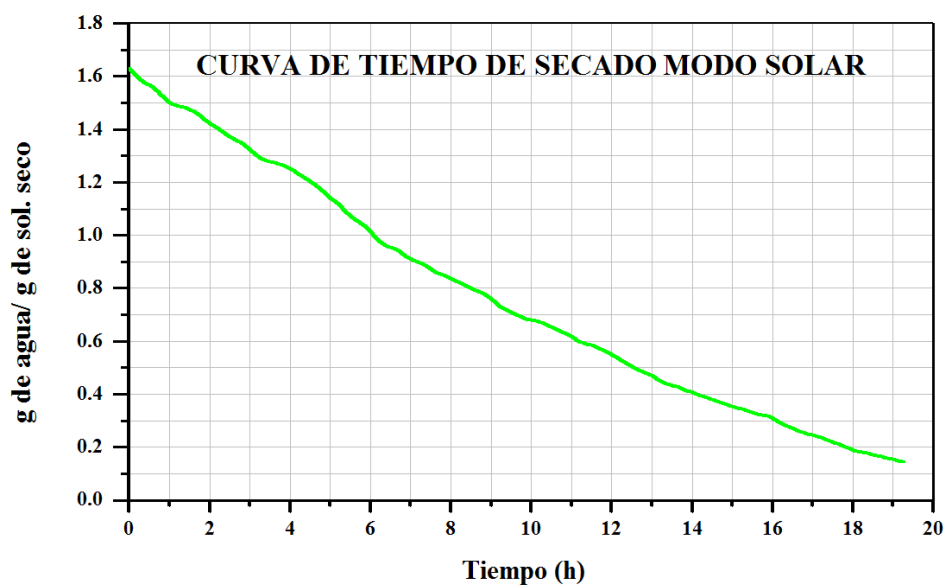
Fuente propia, 2015.

Figura A12.2. Variación de la temperatura del aire en los colectores solares respecto al tiempo.



Fuente propia, 2015.

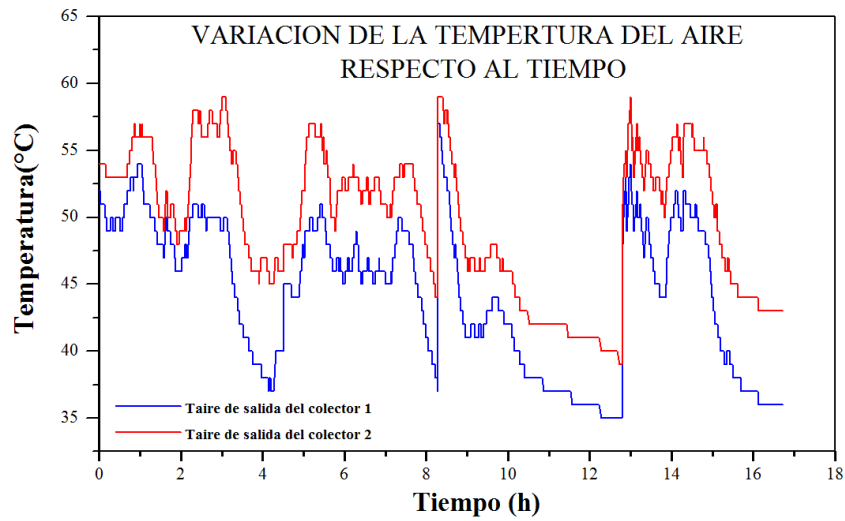
Figura A12.3. Variación de la temperatura y la humedad relativa del aire en el interior del quemador respecto al tiempo.



Fuente propia, 2015.

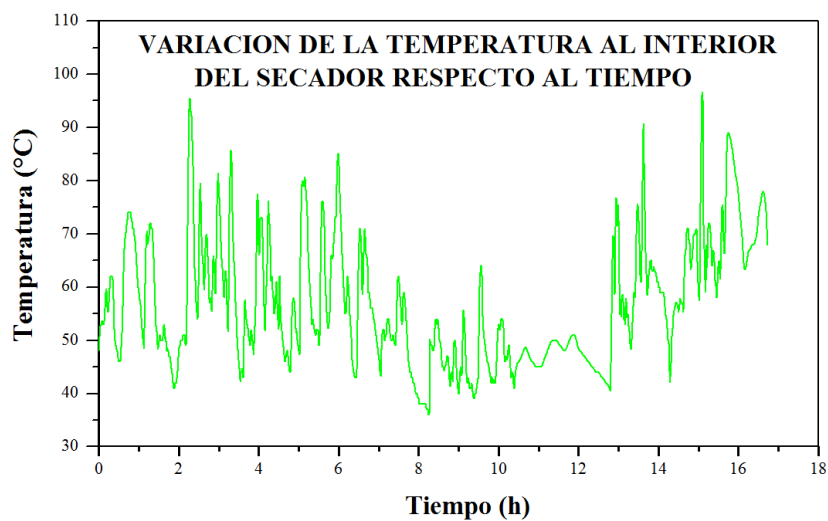
Figura A12.4. Curva de tiempo de secado modo solar.

ANEXO 13: OPERACIÓN DEL EQUIPO EN MODO HÍBRIDO



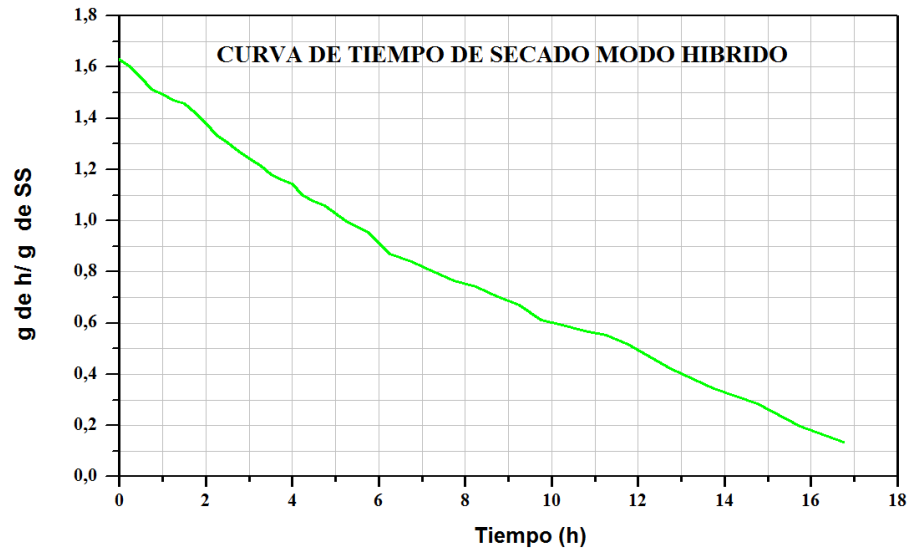
Fuente propia, 2015.

Figura A13.1. Variación de la temperatura del aire en los colectores solares respecto al tiempo.



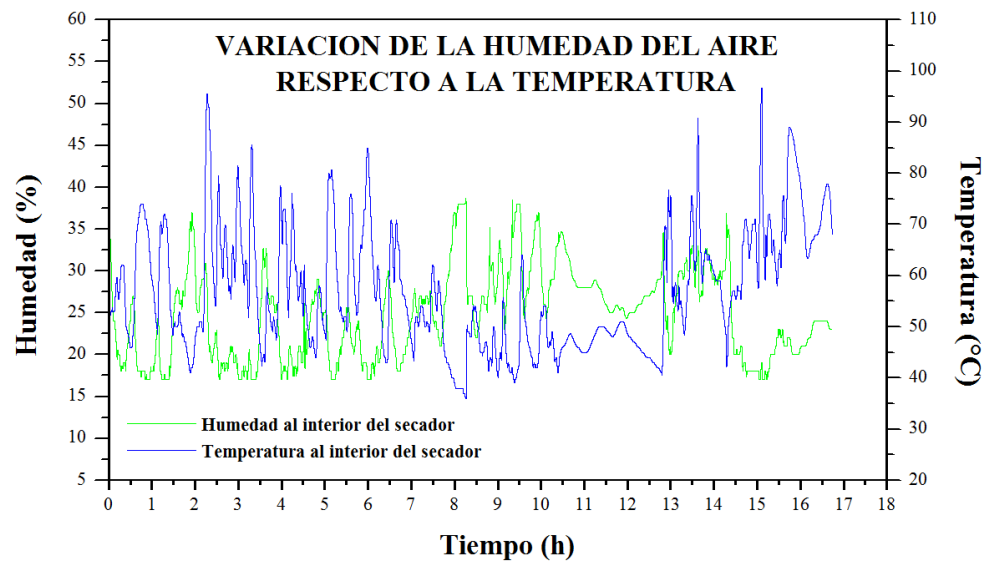
Fuente propia, 2015.

Figura A13.2. Variación de la temperatura al interior del secador respecto al tiempo de secado



Fuente propia, 2015.

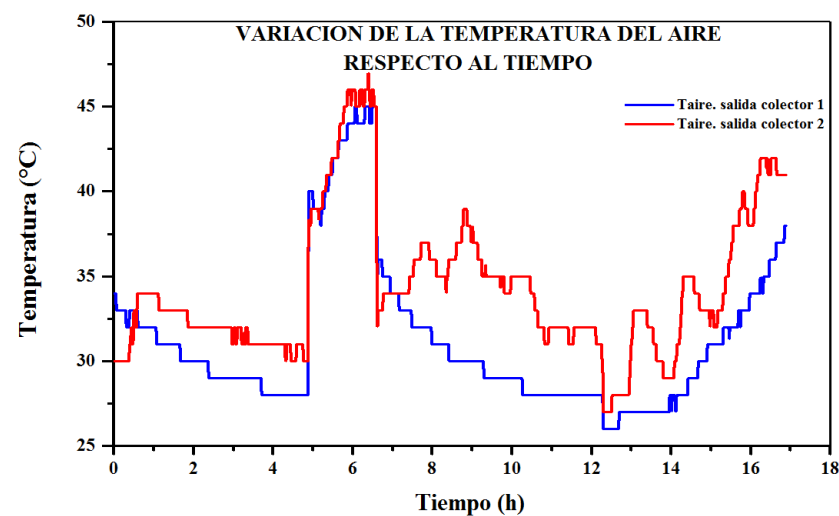
Figura A13.3. Curva de tiempo de secado modo híbrido.



Fuente propia, 2015.

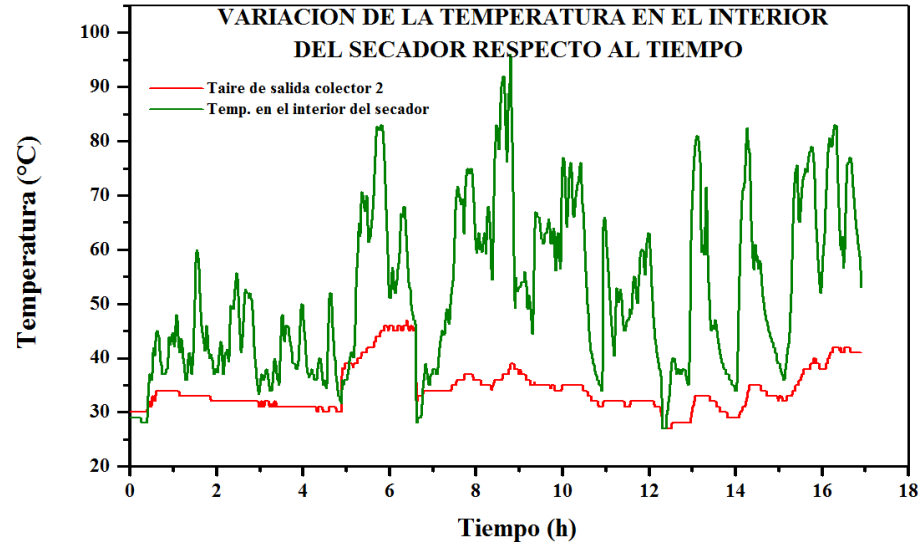
Figura A13.4. Variación de la humedad del aire respecto a la temperatura al interior del secador.

ANEXO 14: OPERACIÓN DEL EQUIPO EN MODO COMBUSTIÓN DE BIOMASA



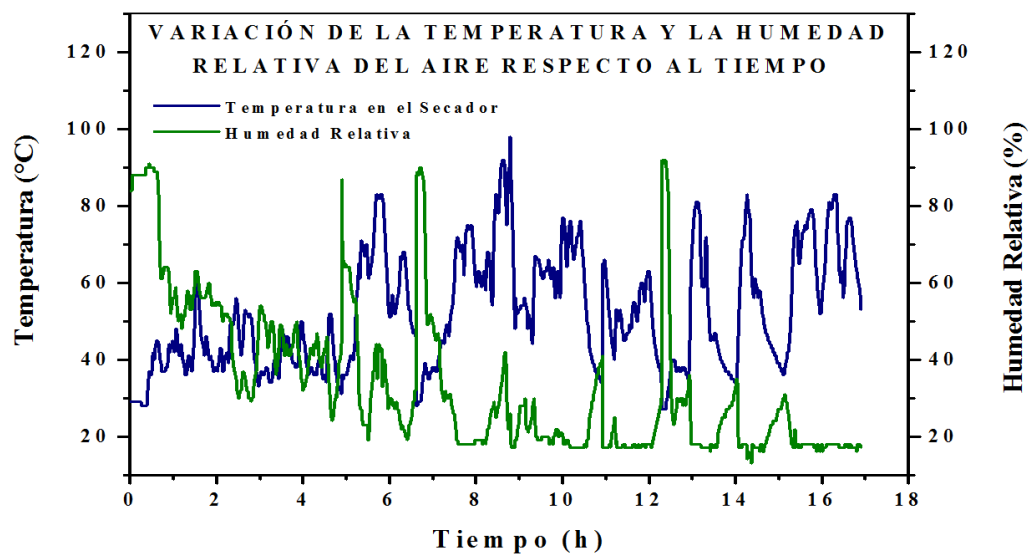
Fuente propia, 2015.

Figura A14.1. Variación de la temperatura del aire respecto al tiempo.



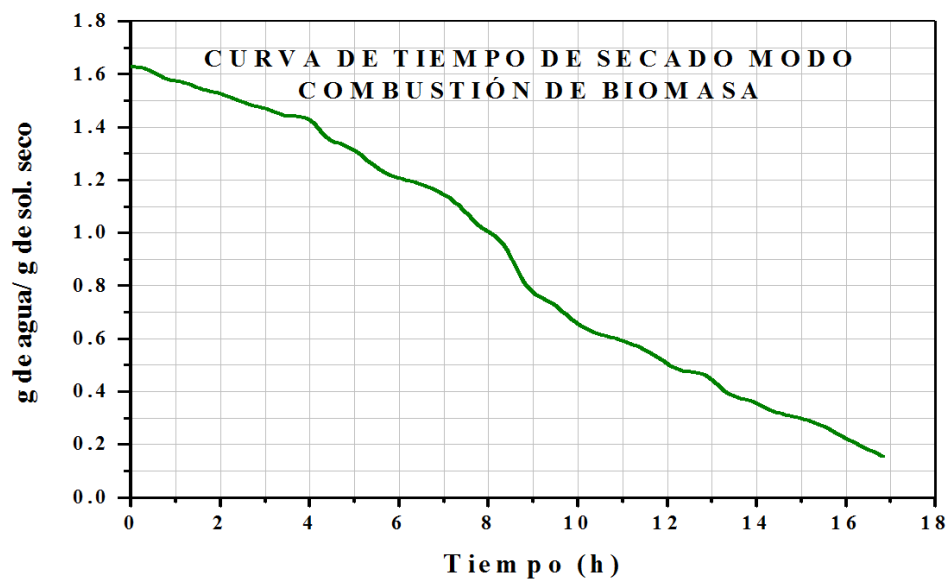
Fuente propia, 2015.

Figura A14.2. Variación de la temperatura en el interior del secador respecto al tiempo.



Fuente propia, 2015.

Figura A14.3. Variación de la temperatura y la humedad relativa del aire al interior del secador respecto al tiempo.



Fuente propia, 2015.

Figura A14.4. Curva de tiempo de secado modo combustión de biomasa

ANEXO 15: TEXTURA DE LA YUCA DESPUES DEL SECADO



Fuente propia, 2015.

Figura A15.1. Yuca después del secado en modo Solar



Fuente propia, 2015.

Figura A15.2. Yuca después del secado en modo híbrido



Fuente propia, 2015.

Figura A15.3. Yuca después del secado en modo combustión de biomasa.